

ANALÝZA VLIVU TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ NA VLASTNOSTI FUNKČNÍCH PLOCH LOŽISEK

ANALYSIS OF THE IMPACT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES ON THE
PROPERTIES OF THE FUNCTIONAL AREAS OF BEARINGS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ZUZANA FIŠEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF CHLADIL, CSc.

BRNO

2019

Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na problematiku technologie výroby ložisek. Cílem práce je zkoumání a vyhodnocení vlivu technologických procesů na vlastnosti funkčních ploch vnějšího ložiskového kroužku. Jako základní technologické procesy byly vybrány technologie rozválcování, broušení a soustružení. Předmětem zkoumání integrity povrchu na zkušebních vzorcích je měření a analýza jakosti obráběných ploch a zbytkového napětí v povrchových vrstvách ložiskových kroužků. Porovnání je provedeno ve vazbě na předchozí operace – rozválcování, soustružení a broušení.

Klíčová slova: ložiskový kroužek, integrita povrchu, technologický proces, řezné podmínky.

Abstract

The dissertation is focused on the bearing production technology issues. The aim of the thesis is to investigate and evaluate the influence of the technological processes on properties of the functional surfaces of an outer bearing ring. The development, rolling, grinding and turning have been selected as basic technological processes. The subject of the surface integrity research on test samples is the measurement and analysis of the quality of the machined surfaces and residual stresses in the surface layers of the bearing rings. The comparison is made in relation to the previous operations - rolling, turning and grinding.

Key words: bearing ring, surface integrity, technological process, cutting conditions.

Bibliografická citace

FIŠEROVÁ, Z. *Analýza vlivu technologických procesů na vlastnosti funkčních ploch ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019, 119s. Vedoucí dizertační práce Doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Analýza vlivu technologických procesů na vlastnosti funkčních ploch ložisek“ vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 2019

Ing. Zuzana Fišerová

Poděkování

Děkuji tímto svému vedoucímu panu doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování disertační práce. Dále bych chtěla poděkovat panu prof. Dr. Ing. Miroslavu Neslušanovi z Žilinské univerzity v Žilině za cenné připomínky a rady při zpracování experimentů. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za trpělivost a toleranci po celou dobu mého studia.

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	8
3	LOŽISKA A JEJICH VÝROBA	9
3.1	MATERIÁLY PRO VALIVÁ LOŽISKA.....	9
3.1.1	<i>Tepelné zpracování ložiskových ocelí.....</i>	<i>12</i>
3.1.2	<i>Kalené materiály.....</i>	<i>14</i>
3.2	KUBICKÝ NITRID BÓRU	16
3.3	SOUSTRUŽENÍ KALENÝCH OCELÍ	17
3.4	BROUŠENÍ KALENÝCH OCELÍ.....	19
3.5	BROUSICÍ NÁSTROJE S KUBICKÝM NITRIDEM BÓRU	21
3.7	PROCES BROUŠENÍ A JEHO IDENTIFIKACE	22
3.8	HODNOCENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ	25
4	INTEGRITA POVRCHU PO BROUŠENÍ KALENÝCH OCELÍ S VYUŽITÍM BARKHAUSENOVA ŠUMU	27
4.1	KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU	27
4.2	TEORIE BARKHAUSENOVA ŠUMU	28
4.3	URČOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ	31
5	PROVEDENÝ EXPERIMENT.....	34
5.1	ANALÝZA MIKROSTRUKTURY A PODPOVRCHOVÉ VRSTVY	35
5.2	ANALÝZA MIKROTVRDOSTI PODPOVRCHOVÉ VRSTVY.....	37
5.3	VYHODNOCENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ.....	39
5.4	ANALÝZA MORFOLOGIE POVRCHU A PODPOVRCHOVÉ VRSTVY POMOCÍ SEM.....	50
5.5	ANALÝZA TOPOGRAFIE POVRCHU	57
5.6	VYHODNOCENÍ BARKHAUSENOVA ŠUMU.....	68
5.7	VÝROBA A ANALÝZA TEM LAMELY	73
6	ALTERNATIVNÍ METODA RENTGENOVÉ DIFRAKTOMETRIE	77
7	ZÁVĚRY	81
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	83
9	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	89
10	VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST.....	91
11	SEZNAM PŘÍLOH	92

1 ÚVOD

Tření dvou těles, která jsou zatížena normálovou silou generuje ztráty energie o tření a způsobuje jejich opotřebení. Vhodný návrh ložiska může minimalizovat tření a opotřebení, stejně jako včasné selhání stroje. Nejdůležitějšími cíly v návrzích ložisek jsou prodloužení jejich životnosti, snížení energetických ztrát z tření, minimalizace jejich opotřebení a snížení výdajů na údržbu a prostoje strojů v důsledku častého selhání ložiska. Neočekávané selhání ložiska ve výrobních závodech způsobuje drahou ztrátu produkce. Navíc v některých případech, jako například u letadel, jsou velmi důležité bezpečnostní aspekty a neočekávanému selhání ložiska musí být zabráněno za každou cenu. Výběr vhodného typu je klíčovým faktorem pro minimalizaci rizika předčasného selhání při opotřebení nebo únavě, čímž je zajištěna dostatečná životnost ložiska.

Vzhledem k trendu snižování velikosti a hmotnosti strojů za účelem zvýšení jejich rychlosti, je výběr vhodného typu ložiska velmi významný. V mnoha případech je to právě omezení ložiska, které limituje rychlost stroje. Je tedy důležité zvolit ložisko, které má nízké tření, aby se minimalizovaly ztráty energie při tření rovnající se výsledku třecího momentu a úhlové rychlosti. Energetické ztráty způsobené třením jsou v ložisku rozptýleny v podobě tepla, přičemž je nezbytné zabránit jeho přehřátí. Pohybuje-li se teplota kluzných ploch příliš blízko bodu tání ložiskového materiálu, může dojít k selhání ložiska. Selhání ložiska je jednou z hlavních příčin poruch v rotačních strojích. Taková porucha přitom může mít v určitých situacích katastrofické následky, jedná-li se např. o rotor vrtulníků či automatické stroje ve zpracovatelském průmyslu.

Přes veškerý vývoj zůstává konstrukční provedení ložisek velmi konzervativní a tato skutečnost zásadně ovlivňuje i použité technologie při jejich výrobě, které musí zaručit optimální integritu povrchu. Integrita povrchu je široký pojem a rovněž její vyhodnocení vyžaduje široký rozsah různých postupů. Jakost povrchu je přitom přímo závislá na aplikovaném způsobu obrábění. Dnešní technologické možnosti jsou podstatně větší než dříve a také jejich vliv na výslednou jakost povrchu je výraznější.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je zkoumání a vyhodnocení vlivu technologických procesů na integritu povrchových vrstev ložiskového vnějšího kroužku S1. Práce by měla přispět k rozšíření znalostí v oblasti třískového obrábění a určení klíčových technologií ovlivňujících integritu finálně obrobeného povrchu. Dalším přínosem by měla být komplexní a vysoce detailní analýza obrobených povrchových vrstev ložiskových kroužků.

Postup řešení se skládá z následujících kroků:

- analýza současného stavu,
- výroba zkušebních vzorků pro experiment,
- analýza topografie obrobených ploch bezkontaktní metodou na 3D profilometru Taylor Hobson Talysurf CCI Lite,
- měření zbytkového napětí analýzou Barkhausenova šumu na přístroji ROLLSCAN 350,
- alternativní způsob měření hodnot zbytkového napětí rentgenovou difraktometrií na přístroji i XRD Stress Measurement System,
- analýza mikrotvrdosti podpovrchové vrstvy,
- vytvoření 3D reliéfů obrobených povrchů pomocí AFM,
- příprava metalografických výbrusů pro zkoumání podpovrchové vrstvy,
- analýza obrobených povrchů pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu,
- příprava a následná analýza lamely užitím transmisního elektronového mikroskopu,
- vyhodnocení výsledků.

Tyto kroky byly realizovány u vybraného výrobce ložisek. Pro měření a výrobu zkušebních vzorků byl využit provoz obrobny vybraného výrobce ložisek. Následné zkoumání a vyhodnocení přesnosti vzorků bylo prováděno ve spolupráci s útvarem jakosti výrobního závodu a Strojnickou fakultou Žilinské university v Žilině, SjF, KOVT, které disponují výše uvedenými měřicími zařízeními.

3 LOŽISKA A JEJICH VÝROBA

Ložiska jsou díly, které snižují tření mezi dvěma pohyblivými plochami. Existují dva základní typy, kuličkové a válečkové, které představují zhruba polovinu světové produkce. Kromě této klasifikace je řada dalších kategorií, jako jsou kuželíková, soudečková či jehličková v nejrůznějších velikostech a přesnostech. Na celém světě se vyrábí více než 200 000 typů ložisek, zatímco dalších 30 % produkce je přizpůsobeno zákazníkem dle jeho požadavků. Použití ložisek pokrývá celý rozsah všech výrobních odvětví, přičemž největším zákazníkem je automobilový průmysl (30 - 40 % celkového objemu) [1, 2].

3.1 Materiály pro valivá ložiska

Kvalita valivých ložisek ve strojírenských zařízeních a výrobcích podstatně ovlivňuje jejich technickou úroveň a spolehlivost. Zvýšení jakosti ložisek má pozitivní dopad na jejich trvanlivost, která je závislá na použitém materiálu a jeho tepelném zpracování, na rozměrové přesnosti, kvalitě funkčních ploch ložiska a jeho rozměrové přesnosti. Na jednotlivé součásti ložiska jsou kladeny vysoké požadavky, zejména na mikrostrukturu a chemické složení materiálu, tak i na jeho topografii povrchu. Dynamická únava, trvanlivost i životnost je výrazně ovlivněna hodnotou zbytkových napětí v povrchových vrstvách obrobených ložisek [3].

Životnost valivých ložisek je dále výrazně ovlivněna mikronečistotami materiálu, v případě ocelí přítomností nekovových vměstků, jejich fyzikálními vlastnostmi, množstvím, velikostí, tvarem, druhem i jejich rozložením. Při tepelném zpracování - kalení dochází k jejich stlačování, což způsobuje vznik vnitřních napětí. Vměstky, které se nacházejí na funkčních plochách ložiska, koncentrují kontaktní napětí a způsobují porušení (kontaktní únavu) ložiska.

Na valivé ložisko působí zatížení, které se přenáší z jednoho kroužku na druhý prostřednictvím valivého tělesa (kulička, váleček, kuželík, apod.). Na valivém ložisku a kroužku, resp. na jeho stykové eliptické ploše vznikají styková tlaková napětí, která valením ložiska pod oběžnou drahou do hloubky 0,3 mm vyvolávají jednosměrné a střídavé cyklické smykové napětí velikosti cca 2000 MPa (max 3000 MPa). Toto napětí způsobuje nukleaci únavové trhlinky, která je běžná u vměstku či porézního místa, apod. Jakost ložiskové oceli je tedy vzhledem k procesu namáhání závislá na matici, morfologii, obsahu a rozložení karbidů a vměstků. Mezi základní požadavky na vlastnosti ložiskové oceli patří [3, 8]:

- tvrdost matrice musí být v rozmezí 61 až 65 HRC,
- vysoká mez únavy ložiska při kontaktním namáhání po dobu několika tisíc hodin,
- vysoká mez kluzu, pevnost a dostatečná houževnatost oceli,

- minimální obsah oxidických vměstků v matici,
- rovnoměrně rozložená karbidická fáze v matici,
- žádné vnitřní a vnější vady v dodaném materiálu (poréznost, trhlinky apod.).

Valivá ložiska nebývají v praxi obvykle příliš dynamicky namáhána, proto se na jejich výrobu používají poměrně křehké vysokouhlíkové, nízkolegované chromové nebo chrommanganové oceli. Tyto oceli se kalí a popouštějí za nízkých teplot. Po tepelném zpracování je základní matrice ložiska tvořena nízko popuštěným jemným martenzitem a zbytkovým austenitem (asi do 10 %), z níž by mělo být vyloučeno přibližně 10 % rovnoměrně rozložených karbidů typu (Fe, Cr, Mn) $3C$. Oceli s touto strukturou se dají dobře brousit, což zajišťuje výrobu valivých ložisek přesných tvarů, mají vysokou odolnost proti kontaktní únavě, minimální ztrátu rozměrů při opotřebení a odolnosti proti tepelnému namáhání do teploty asi 120 °C [9].

Jakost ložiskové oceli je výrazně ovlivněna obsahem vměstků v matici, jejich morfologií a rozložením. Podle chemického složení se rozdělují vměstky do 4 typů: typ A zahrnuje lehce tvářitelné sulfidy, typ B - netvářitelné oxidy Al_2O_3 , typ C - křemičitany a typ D - komplexní oxidy.

Dalším parametrem, který je sledován při hodnocení jakosti ložiskové oceli, je mikroporéznost ve výchozím polotovaru. U tyčí do průměru 40 mm je zcela nepřípustná, u tyčí do průměru 80 mm se může vyskytovat ve velmi omezeném množství. Na trvanlivost ložisek má vliv také orientace vláken vývalku a oběžné dráhy ložiska. Výrobky s polohou oběžné dráhy v místech odebraných ze středové části tyče (např. vnitřní kroužky soustružené z tyčí), mají nejnižší jakost. Naopak mezi nejlepší polotovary na výrobu ložisek se řadí tažené trubky děrované za tepla a rozválcovaný výkovek.

Polotovary, které jsou určeny k výrobě ložisek, musí mít oduhličený povrch na minimální hodnotu, čímž se snižuje tloušťka přídavek na obrábění. Při obrábění je nutné oduhličenou vrstvu zcela odstranit, což vede ke zvýšení nákladů.

Požadavek na funkčnost při extrémně vysokých teplotách vyvolala nutnost vývoje speciálních ložiskových materiálů: slinutých karbidů a keramiky. Byly zkoumány materiály jako karbid titanu, karbid wolframu, karbid křemíku, sialon a zvláště nitrid křemíku. Při zvýšených teplotách tyto materiály uchovávají tvrdost, mají odolnost proti korozi a poskytují některé jedinečné vlastnosti, z nichž některé jsou výhodné, jako například nízká měrná hmotnost u nitridu křemíku. Naopak jiné vlastnosti těchto materiálů, jako je extrémně vysoký pružný modul a nízké tepelné koeficienty roztažnosti u nitridu křemíku ve srovnání s ocelí, vytvářejí významné problémy s konstrukcí ložisek, které musí být překonány, pokud mají tyto materiály úspěch pro použití v konstrukčních prvcích valivých ložisek, zejména kroužků [4]. Evans [5] ve své studii zjistil, že povrchová poškození stále více omezují životnost valivých ložisek v náročných prostředích. Z toho důvodu otestoval třecí účinnost černé oxidové chemické úpravy a karbidu wolframu povlakovaného diamantovým povlakem (WC / a-C: H), přičemž tento se ukázal být vhodnější pro omezení opotřebení ložiska. Wang

[6,7] ve svých studiích prezentoval nový materiál vysoce izostaticky lisovaný nitrid křemíku (HIPed Si_3N_4), jež je možné použít pro výrobu vysoce výkonných ložisek. Analýzy prokázaly výhody použití nitridu křemíku při těžkých podmínkách mazání a opotřebení, jako jsou extrémní teploty, velké teplotní rozdíly, vysoká rychlost, ultra vysoké vakuum a v kritických aplikacích, kde mohou například reagovat na požadavky krátkých období provozu oleje v leteckém motoru. Další výhody, které byly prokázány, jsou odolnost proti korozi a tolerance kontaminovaných maziv.

Ložiskové oceli se rozdělují do dvou základních skupin podle podmínek uložení:

- ložiskové oceli pracující v podmínkách běžného uložení,
- ložiskové oceli pracující v uložení namáhaném vyšší teplotou nebo v uložení, kolem kterého je korozní prostředí.

Většina ložiskových ocelí je zařazena do první skupiny. Základní typy ložiskových ocelí jsou chromové a chrommanganové vysokouhlíkové oceli. Do této skupiny jsou zařazeny i testované oceli jakosti dle ČSN 41 4109 a ČSN 41 4209, jejichž chemické složení je uvedeno v tab. 3.1. Ložiska větších rozměrů jsou vyráběny z ocelí se zvýšenou prokalitelností, které se dosahuje přidáním manganu a chromu.

Ložiska, která se používají v korozním prostředí (např. v páře kyseliny dusičné nebo roztoku chloridu sodného při teplotě od $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$), se vyrábějí z vysokouhlíkových chromových ocelí. Obsah uhlíku těchto ocelí je okolo 1 %. Přítomnost uhlíku zvyšuje tvrdost po zakalení a chrom zajišťuje odolnost proti korozi. Na výrobu miniaturních ložisek pracujících v korozním prostředí do teploty $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ se používá vysokolegovaná ocel s přísadou molybdenu (např. X105CrMo17) [10].

Ložiska, která jsou používána ve velmi namáhaném uložení za teplot nad $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (např. uložení hřídelí leteckých turbinových motorů), jsou vyráběny z nástrojové rychlořezné oceli. Vhodná je např. ocel jakosti dle ČSN 41 9802, ze zahraničních El 347 a AISI M 50.

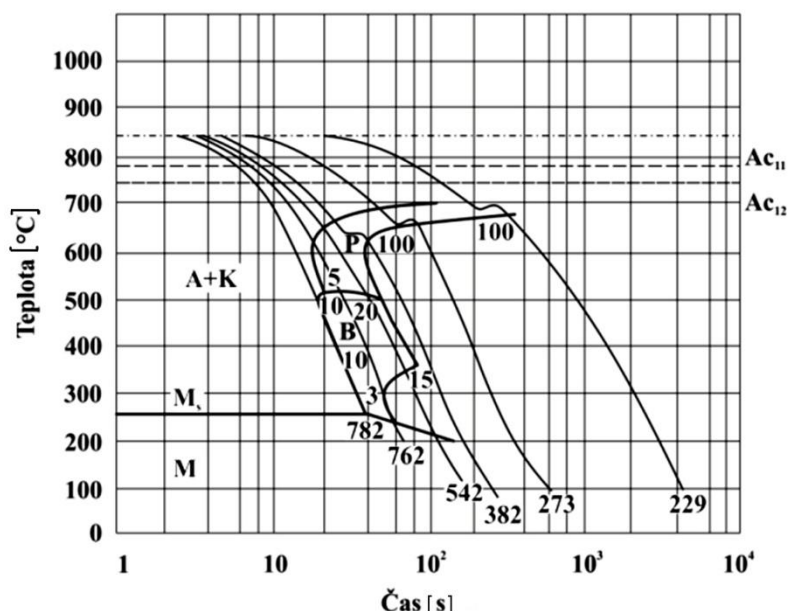
Tab. 3.1 Chemické složení oceli na valivá ložiska včetně speciálních [3]

Označení materiálu	Chemické složení dané normou v hm. %						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V
ASTM A295(5 2100)	0,98	0,25	0,15	1,3			
ISO grade 1,683/WII	1,1	0,45	0,35	1,6	0,1		
ASTM-A295 (51100)	0,98	0,25	0,15	0,9			
DIN 105 Cr4	1,1	0,45	0,35	1,15	0,1		
ASTM-A295 (50100)	0,98	0,25	0,15	0,4			
DIN 105 Cr2	1,1	0,45	0,35	0,6	0,1		
ASTM-A295(5 195)	0,9	0,75	0,15	0,7			
ASTM-A295 (K19526)	0,89	0,5	0,15	0,4			
ASTM-A295 (1570)	0,65	0,8	0,15				
ASTM-A295 (5160)	0,56	0,75	0,15	0,7			
ASTM-A485 grade 1	0,95	0,95	0,45	0,9			
ISO Grade 2,6831XVII	1,05	1,25	0,75	1,2	0,1		
ASTM-A485 grade 2	0,85	1,4	0,5	1,4			
ASTM-A485 grade 3	0,95	0,65	0,15	1,1	0,2		
ASTM-A485 grade 4	0,95	1,05	0,15	1,1	0,45		
DIN 100 Cr Mo 6	0,92	0,25	0,25	1,65	0,3		
ISO-grade 4,683/XVII	1,02	0,4	0,4	1,95	0,4		
SAE 4118	0,18	0,7	0,15	0,4	0,08		
SAE 8620, ISO 12	0,18	0,7	0,15	0,4	0,15		
DIN 20 NiCrMo2	0,23	0,9	0,35	0,6	0,25	0,4	
SAI3 5120	0,17	0,7	0,15	0,7		0,7	
AFNOR 1863	0,22	0,9	0,35	0,9			
SAE 4720, ISO 13	0,17	0,5	0,15	0,35	0,15	0,9	
SAE 4620	0,17	0,45	0,15		0,2	1,65	
SAE 4320, ISO 14	0,17	0,45	0,15	0,4	0,2	1,65	
SAE E9310	0,08	0,45	0,15	1	0,08	3	
SAE E3310	0,08	0,45	0,15	1,4		3,25	
KRUPP	0,1	0,45	0,15	1,35		3,75	
M50	0,8	0,25	0,25	4	4,25	0,1	1
BG-42	1,12	0,5	0,2	14,5	4		1.2
440-C	1,1	1	1	17	0,75		
CBS-60	0,2	0,6	1	1,45	1		

3.1.1 Tepelné zpracování ložiskových ocelí

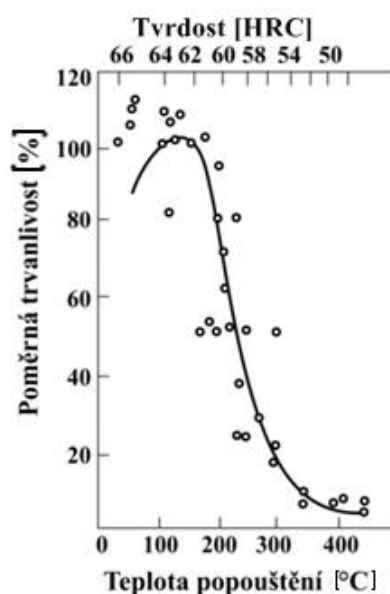
Ložiskové oceli jakosti dle ČSN 41 4109 a ČSN 41 4209 jsou kaleny z teploty 830°C do oleje. Poté se oceli popouštějí při teplotě 170 °C. Na obr. 3.1 je zobrazen diagram ARA (anizotermického rozpadu austenitu) oceli jakosti dle ČSN 41 4109. Ocel ČSN 41 4209 má vyšší prokalitelnost vzhledem ke zvýšenému podílu manganu. Oceli se před kalením žihají na měkko, aby strukturu tvořil sferoidizovaný perlit, zatímco ve vyžíhané

oceli se povoluje max. 10 % lamelárního perlitu. Po vyžihání na měkko se tvrdost pohybuje mezi 187 až 207 HB, u oceli ČSN 41 4209 se povoluje až 217 HB (tvrdost podle Brinella - ČSN EN ISO 6506). Optimální obsah karbidů po vyžihání na měkko je cca 14 %.



Obr. 3.1 Diagram anizotermického rozpadu austenitu oceli ČSN 41 4109 [11].

Podle ČSN EN ISO 683-17 se v kaleném stavu hodnotí tvrdost a vzhled lomu. Tvrdost by se měla pohybovat v rozmezí 61 až 65 HRC. Na obr. 3.2 je zobrazen vliv tvrdosti a popouštěcí teploty na trvanlivost ložiska. Předpisy výrobců doporučují hodnocení hrubosti martenzitu vzhledem k etalonu. V matrici nesmí být přítomen jemný perlit a kalicí trhlinky [11].



Obr. 3.2 Vliv tvrdosti a popouštěcí teploty na trvanlivost ložiska z oceli ČSN 41 4109 [11].

3.1.2 Kalené materiály

Vývoj v oblasti kalených materiálů je spojen s vývojem nástrojových materiálů, jako jsou slinuté karbidy a jejich povlakování, kubický nitrid boru (KNB) a řezná keramika. U kalených materiálů se využívá efektu měknutí obráběného materiálu před břítem nástroje a výrazného snižování silového zatížení stroje a nástroje. Aby mohlo dojít k obrábění, je nezbytné vhodně zvolit nástrojový materiál nebo povlak, který vzniklým vysokým teplotám v řezu odolá. S obráběním kalených materiálů se setkáváme především v automobilovém průmyslu nebo při výrobě forem a zápusťek. Vložené hřídele, skříně převodovek, pastorky řízení, lisovadla jsou typické součástky z těchto materiálů - viz obr. 3.3. Při obrábění těchto materiálů o tvrdosti až 70 HRC, (tvrdost samotného nástroje ze slinutého karbidu je cca 75 HRC), jsou použité nástroje velmi citlivé především na správnou geometrii, vhodně zvolený povlak a stanovení vhodných řezných podmínek. Výrobci řezných nástrojů nebo povlaků standardně garantují obrábění do tvrdosti 60 až 63 HRC [12, 13].



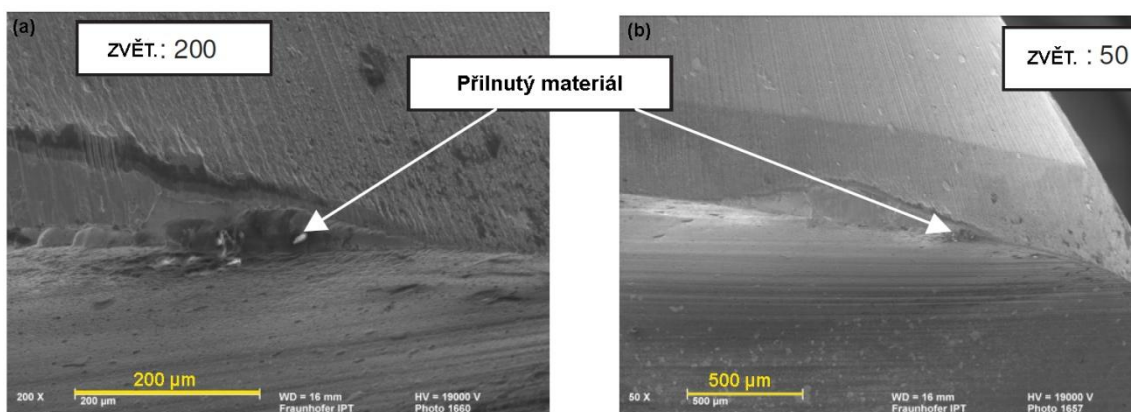
Obr. 3.3 Příklad součásti vyrobené z kaleného materiálu – nosná hřídelová sestava [12].

Obráběné materiály lze rozdělit podle několika kritérií, jako je chemické složení, způsob výroby, jakost, další zpracování, účel a způsob použití, typický druh výrobků, obrobitelnost, atd. Z hlediska obrobitelnosti patří kalené oceli mezi těžkoobrobitelné materiály. Ty lze rozdělit do několika skupin. Konstrukční oceli zušlechtěné na vysokou pevnost a tvrdost. Patří sem uhlíkové a slitinové konstrukční oceli zušlechtěné na pevnost větší než 1000 MP anebo zakalené na tvrdost přes 35 HRC. Do skupiny ocelí zušlechtěných na vysokou tvrdost patří také chromové oceli s obsahem cca 1% C a 1,5% Cr pro valivá ložiska, oceli pro lité válce, nástrojové oceli v zušlechtěném stavu [14,15].

Podle ISO patří kalené materiály a popuštěné oceli s tvrdostí > 45 až 68 HRC do skupiny ISO H Tvrzená ocel. Mezi nejběžnější oceli patří cementované oceli (cca 60 HRC), oceli pro kuličková ložiska (cca 60 HRC) a nástrojové oceli (cca 68 HRC).

Do této skupiny jsou také zařazeny konstrukční oceli (40 až 45 HRC), manganové oceli a různé typy slinutých karbidů. Soustružené tvrzené součásti mají nejčastěji tvrdost v rozmezí 55 až 68 HRC [15]. Příklady materiálů vhodných pro kalení jsou uvedeny v tab. 3.2. Kalené oceli z hlediska obrábění představují nejmenší skupinu a nejčastěji prováděnou obráběcí operací je u nich dokončování. Měrná řezná síla se pohybuje v rozmezí 2 550 až 4 870 MPa [16]. Proces se obvykle vyznačuje velmi dobrou kontrolou utváření třísky, naproti tomu řezné síly a požadavky na výkon jsou poměrně vysoké.

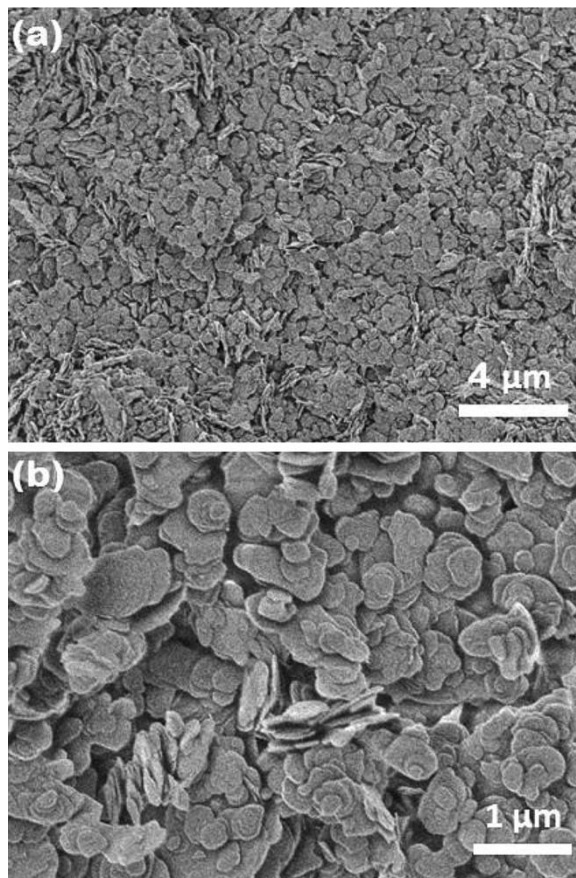
Materiál obráběcího nástroje musí mít dobrou odolnost proti plastické deformaci (tvrdost za tepla), chemickou stabilitu (za vysokých teplot), mechanickou pevnost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Všechny tyto vlastnosti má KBN, který umožňuje použití soustružení namísto broušení. Pro soustružení se používá také smíšená nebo vlákny vyztužená řezná keramika, a to v případě, že u obrobku je požadována střední jakost obrobené plochy a tvrdost je příliš vysoká pro použití slinutých karbidů. Použití slinutých karbidů převládá u frézování a vrtání a je možné pro materiály o tvrdosti až cca 60 HRC [16,17]. Benga [18] se ve své studii zabýval obrobitelností kalené ložiskové oceli 100Cr6 (62-64 HRC) při kontinuálním soustružení (bez použití procesní kapaliny) za použití nástrojů ze směsné keramiky, vlákny vyztužené keramiky a polykrystalického kubického nitridu bóru (KBN). Co se týče životnosti nástroje, byly nejlepší výsledky dosaženy s nástrojem z KBN, přičemž následoval nástroj ze směsné keramiky při nízké posuvové rychlosti. Kumar [19] ve své studii zkoumal opotřebení keramických řezných nástrojů na bázi oxidu hlinitého. Zkoušky obrábění byly provedeny pomocí keramického nástroje z oxidu hlinitého vyztuženého křemíkem SiC a nástroje ze směsné keramiky Ti [C, N], přičemž obráběným materiálem byla martenzitická korozivzdorná ocel třídy 410 a EN 24. Bylo zjištěno, že opotřebení boků nástroje ze směsné keramiky Ti [C, N] bylo nižší než opotřebení řezného nástroje z oxidu hlinitého vyztuženého SiC. Gopalsamy [27] se ve své studii zabýval nalezením optimálních parametrů procesu pro dokončovací frézování kalené oceli, přičemž analyzovanými faktory byly výsledná jakost povrchu a životnost nástroje. Adheze třísek se ukázala být hlavní příčinou opotřebení nástroje, což je znázorněno na obr. 3.4. Výsledky získané metodou Taguchi prokazují, že nejvíce ovlivňujícím parametrem byla řezná rychlost.



Obr. 3.4 Opatření nástroje (řezná rychlost $204 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv $0,05 \text{ mm} \cdot \text{zub}^{-1}$, šířka záběru hlavního ostří nástroje $0,2 \text{ mm}$) (a,b) představují různá zvětšení SEM snímku [27].

3.2 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru se v přírodě nenachází. Je to syntetický materiál, který se vyrábí syntézou za vysokých tlaků a teplot z hexagonálního nitridu boru viz obr. 3.5 [20].



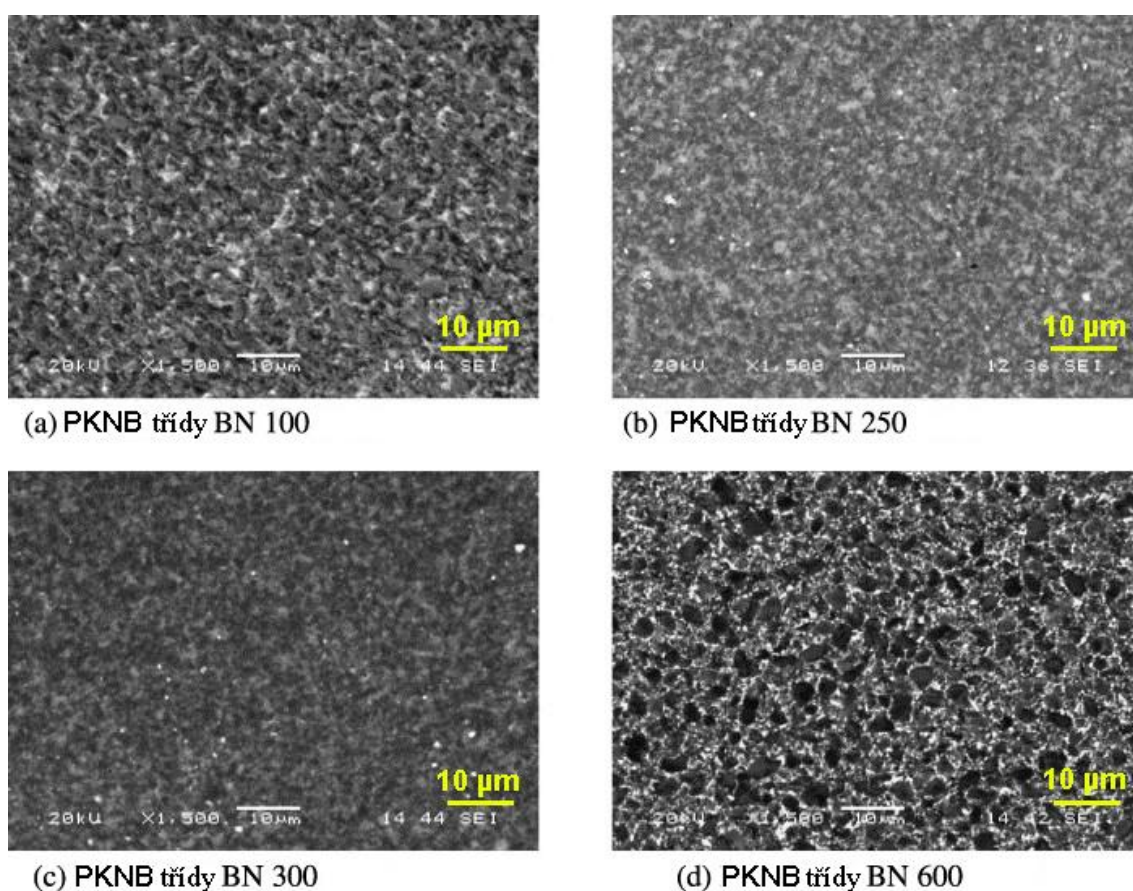
Obr. 3.5 (a) snímky s nízkým a (b) vysokým zvětšením SEM prášku KNB [20].

Nitrid boru (nitrid boritý, NB) vykazuje mnoho podobností s grafitem. Má hexagonální strukturu, je bílý, měkký (vhodný jako mazací materiál), elektricky nevodivý, termicky stálý a málo reaktivní. Od grafitu se liší pouze barvou (grafit je černý) a elektrickými vlastnostmi (grafit je elektricky vodivý) [21, 22].

Kubický nitrid boru byl vyroben až po objevu, že hexagonální forma může být při vysokých teplotách a tlacích (hodnoty jsou prakticky stejné jako při přeměně grafitu na diamant) transformována na kubickou, který učinil R. H. Wentorf, jr. (rok 1957, General Electric Company, USA). Má obdobné vlastnosti jako diamant, oproti diamantu má mnohem nižší tepelnou vodivost, hodnoty součinitele délkové roztažnosti v rozsahu teplot $430 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou o něco vyšší než u diamantu. Je extrémně stabilní na vzduchu, v dusíkové atmosféře a ve vakuu, teplota musí přesahovat $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1550 \text{ }^{\circ}\text{C}$, aby došlo k nějakým změnám. Je to výrazný rozdíl ve srovnání s diamantem,

u kterého se v přítomnosti kyslíku tvoří na povrchu grafitový povlak již při teplotě 650 °C. Mřížková konstanta BN ($0,3615 \pm 0,0001$ nm, při teplotě 25 °C) i minimální meziatomová vzdálenost (0,156 nm) jsou o něco větší než u diamantu. Specifická hmotnost je $3,48 \text{ g.cm}^{-3}$, tvrdost je podle Morse 9 až 10. Na rozdíl od diamantu má vyšší chemickou stálost a tepelnou odolnost (1100 °C až 1200 °C). Z těchto důvodů se využívá hlavně na opracování zušlechtěných kalených nástrojových ocelí [22,23, 24,30].

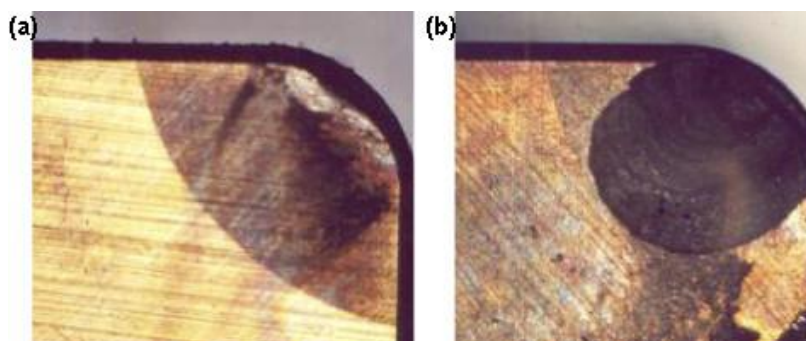
Polykrystalický kubický nitrid bóru, jehož mikrostruktura je znázorněná na obr. 3.6 je materiál s mimořádně vysokou tvrdostí za tepla, který lze používat při velmi vysokých řezných rychlostech. Vyznačuje se také velmi dobrou houževnatostí a odolností proti tepelným rázům [25,31].



Obr. 3.6 Polykrystalický kubický nitrid bóru jednotlivých tříd [25].

3.3 Soustružení kalených ocelí

Nástrojový materiál polykrystalický nitrid bóru se používá zejména pro dokončovací soustružení kalených ocelí o tvrdosti nad 45 HRC. Nad hodnotou 55 HRC je KNB jediným nástrojovým materiálem, který může nahradit tradičně používané metody broušení. Oceli s tvrdostí menší než 45 HRC obsahují vyšší množství feritu, který má negativní vliv na odolnost KNB proti otěru [27,35].



Obr. 3.7 Opotřebení nástroje (a) na počátku obrábění, (b) po 80 min obrábění při řezné rychlosti = 120 m /min, posuv = 0,08 mm, šířka záběru hlavního ostří nástroje = 0,5 mm [29].

Sahin [26] ve své studii, která se zabývala obráběním kalených ocelí AISI 1050 pomocí řezných nástrojů z kubického nitridu bóru zjistil, že posuv je dominantní faktor pro výslednou jakost povrchu. Průměrná hodnota parametru R_a přitom činila přibližně 0,823 μm při obrábění kalených ocelí pomocí KNB. Qian [28] se zabýval numerickými simulacemi vysokorychlostního ortogonálního obrábění ložiskové oceli AISI 52100, oceli AISI H13, AISI D2 a nízkolegovanou oceli AISI 4340. Použitým nástrojem byly břitové destičky z KNB. Na základě analýz zjistil, že kromě parametrů nastavení, geometrii řezného nástroje a tvrdosti obrobku má posuv nejvýznamnější vliv na řezné a posuvové síly. Řezná a posuvná síla se zvyšují s rostoucím posuvem, poloměrem špičky nástroje, záporným úhlem sklonu a tvrdostí obrobku. Yallese [29] se ve své studii zabýval ekonomickou variantou k výrobě ložisek, a to soustružením již zakaleného materiálu nástrojem z kubického nitridu bóru. Výsledky ukázaly, že nástroj měl dobrou odolnost proti opotřebení (obr. 3.7) a kvalita povrchu obrobených součástí byla srovnatelná s broušením. Vlivem opotřebení hřbetu nástroje z KNB při obrábění kalených ocelí se ve své studii zabýval Poulachon [32]. Zjistil, že opotřebení hřbetu nástroje má výrazný vliv na integritu a jakost obrobeného povrchu, a to včetně geometrické přesnosti. Mechanismy opotřebení závisejí nejen na chemickém složení KBN a druhu jeho pojiva, ale také na tvrdosti a především na mikrostruktuře (procento martenzitu, typ, velikost, složení tvrdých fází, atd.) nástrojového materiálu. Kurt [33] provedl ve své studii experimenty zabývající se soustružením ložiskové oceli AISI 52100 pomocí nástroje z KNB. Analýzy měření síly při obrábění ukázaly, že normální úhel čela γ_n má velký vliv na řezné síly a namáhání nástroje, zejména u pasivní síly a rozložení napětí. Z této práce lze vyvodit, že kritický úhel čela γ_n je 20 °. Kishawy [34] ve své studii zkoumal charakteristiky opotřebení nástroje z KBN a integritu povrchu při vysokorychlostním soustružení kalené nástrojové oceli D2. V závislosti na podmínkách obrábění byla získána široká škála rozdělení zbytkového napětí pod obrobeným povrchem. Nepříznivé tahové zbytkové napětí bylo minimalizováno při vysokých řezných rychlostech a vysokých hodnotách šířek záběru hlavního ostří nástroje. To odhaluje možnost optimalizace podmínek obrábění pro odstranění nežádoucího zbytkového napětí.

3.4 Broušení kalených ocelí

Jednou z možností dokončovacího obrábění kalených ocelí je broušení, které dříve bylo jediným možným způsobem jak kalenou ocel obrábět. Doporučené řezné podmínky při broušení kotoučem z kubického nitridu bóru (KNB) jsou uvedeny v tab. 3.2. V současnosti se broušení kalených ocelí uplatňuje především při dokončovacích operacích. Jako brusný materiál je využíváno buď konvenčních keramických materiálů na bázi umělého korundu nebo moderních superabrazivních brousicích materiálů z kubického nitridu bóru [37,38].

Na kvalitu broušení má významný vliv stav stroje, upnutí brousicích kotoučů, řezné podmínky, chlazení, čištění, oživování a orovnávání kotoučů. Používání kotouče s KNB vyžaduje podstatně vyšší nároky na technický stav stroje než při použití kotoučů s klasickými brusivy. Stroj musí být dokonale tuhý, bez vibrací, vřeteno musí být uloženo s maximální radiální a axiální házivostí 0,005 mm a zaručující minimální chvění při broušení. Důležitou podmínkou je tuhé uchycení nebo upnutí obrobku. Jakékoliv chvění stroje nebo obrobku nepříznivě ovlivňuje životnost kotouče, jakost povrchu, ale i výkon broušení a stálost tvaru kotouče [39,40].

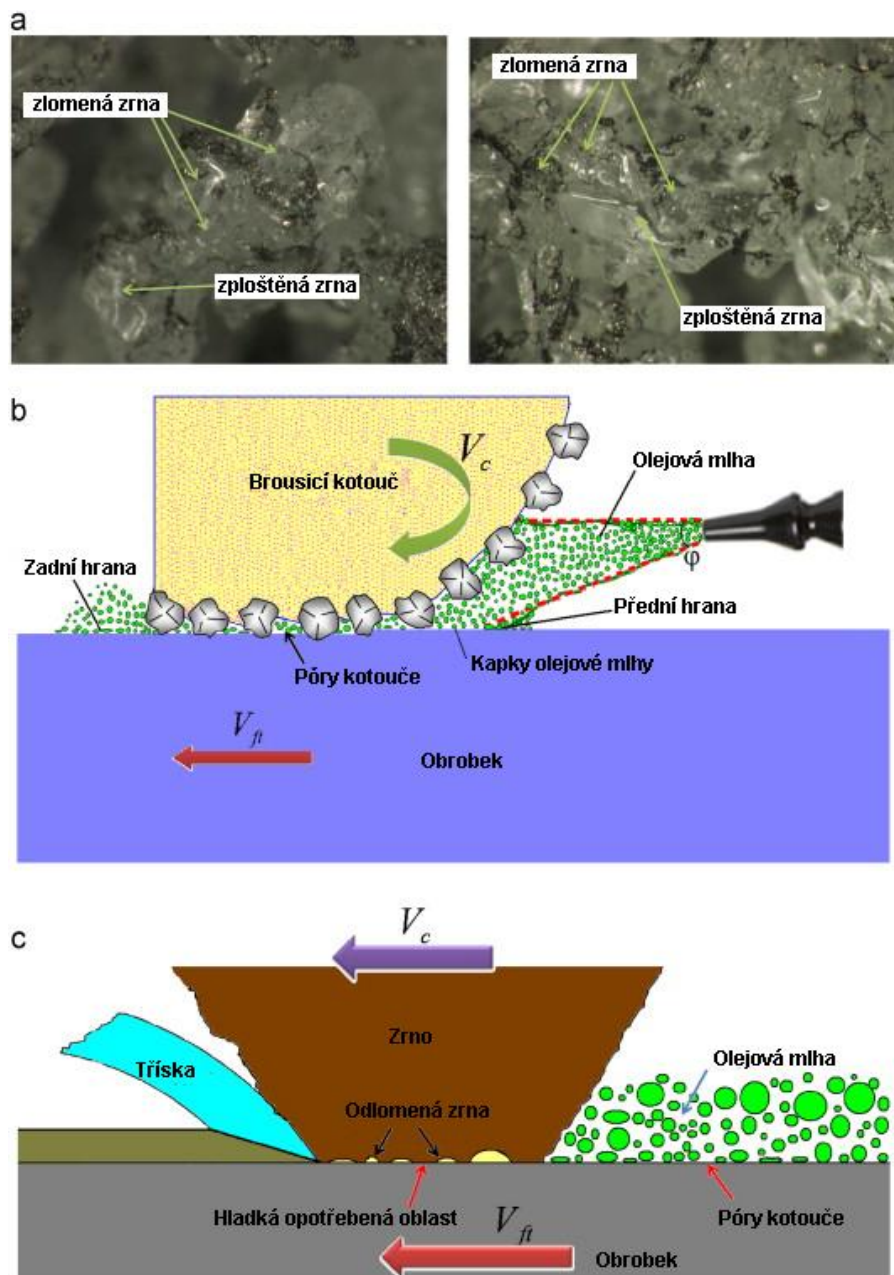
Tab. 3.2 Doporučené řezné podmínky při broušení kubickým nitridu bóru [36].

Druh broušení	Pojivo kotouče	Řezná rychlost [m.s ⁻¹]	Rychlost otáčení obrobku [m.min ⁻¹]	Podélný posuv [m.min ⁻¹]	Příčný posuv [mm.zdvih ⁻¹]	Přísuv [mm.průchod ⁻¹]
Ostření nástrojů	pryskyřičná keramika	20 až 30	-	0,5 až 1,5	-	0,01 až 0,03
		30 až 35	-	0,5 až 1,5	-	0,01 až 0,05
Broušení vnějších válcových ploch	pryskyřičná keramika	30 až 40	8 až 10	0,5 až 1,0	-	0,002 až 0,01
		30 až 35	10 až 25	0,5 až 1,0	-	0,01 až 0,05
Broušení vnitřních válcových ploch	pryskyřičná keramika	-	-	-	-	-
		10 až 35	8 až 25	0,3 až 1,0	-	0,002 až 0,005
Rovinné broušení	pryskyřičná keramika	30 až 40	-	3 až 5	0,3 až 0,6	0,005 až 0,02
		30 až 35	-	8 až 10	0,3 až 0,6	0,04 až 0,1
Řezání s chlazením	pryskyřičná keramika	25 až 30	-	0,1 až 0,2	-	0,2 až 0,8
Řezání bez chlazení	pryskyřičná keramika	12 až 18	-	0,1 až 0,2	-	0,2 až 0,4

Základem pro ekonomické využití KNB kotouče je správný výběr jeho charakteristik nabízeným výrobcem, tj. typ, rozměr, pojivo, zrnitost brusiva, koncentrace brusiva, ale i jeho použití za vhodných řezných podmínek, na vhodném typu brousicího stroje. Stejně důležité je chlazení, tuhé upnutí nástroje i obrobku, obráběný materiál, přídavky na broušení, požadovaná jakost povrchu, možnost orovnávání, případně čištění kotouče,

atd. Zajistit optimální řezné podmínky v praxi je velmi obtížné, neboť existuje mnoho způsobů broušení [41].

Problematikou broušení kalených materiálů se ve svých studiích zabývalo mnoho autorů [43,44,45,46], přičemž někteří z nich se rozhodli porovnat dokončovací technologii soustružení právě s broušením. Tawakoli [42] ve svém článku zkoumal vliv procesních kapalin při broušení kalené ložiskové oceli 100Cr6. Jeho studie měla za cíl ukázat účinky procesních kapalin a parametrů obrábění na síly při broušení a výslednou kvalitu obrobku. Schéma procesu experimentu je znázorněno na obrázku 3.8.



Obr. 3.8 (a) mechanismus opotřebení brousícího zrna (zvětšení: 175x), (b) schéma rozprašování olejové mlhy při broušení a (c) zdroje maziva na rozhraní zrn a povrchu obrobku [42].

Mao [47] ve své studii zkoumal mechanismy tvorby a vlastnosti ovlivněné vrstvy po broušení oceli AISI 52100. Zjistil, že fázová transformace, stejně jako zachovaná austenitová a bílá vrstva, může být vytvořena při teplotě broušení pod jmenovitou fázovou transformační teplotou materiálu obrobku. Mechanický efekt spojený s plastickou deformací může také ovlivňovat tvorbu bílé vrstvy a hraje důležitou roli při fázové přeměně vlastního obrobku. Navíc byla na povrchu kalené oceli zjištěna vyšší tvrdost a zbytkové namáhání v tahu, avšak žíhaná ocel vykazuje zbytkové tlakové napětí.

3.5 Brousicí nástroje s kubickým nitridem bóru

Brousicí kotouče a tělíska s kubickým nitridem boru se především používají na obrábění tvrdých materiálů. Tyto nástroje mají vysoký výkon broušení, vysokou produktivitu práce, dlouhou životnost a stálost tvaru. Pro využití jejich předností je nutno vybrat správné parametry nástroje [8].

Přes vyšší pořizovací náklady přináší používání KNB kotoučů nesporné výhody a úspory. Je to především [49]:

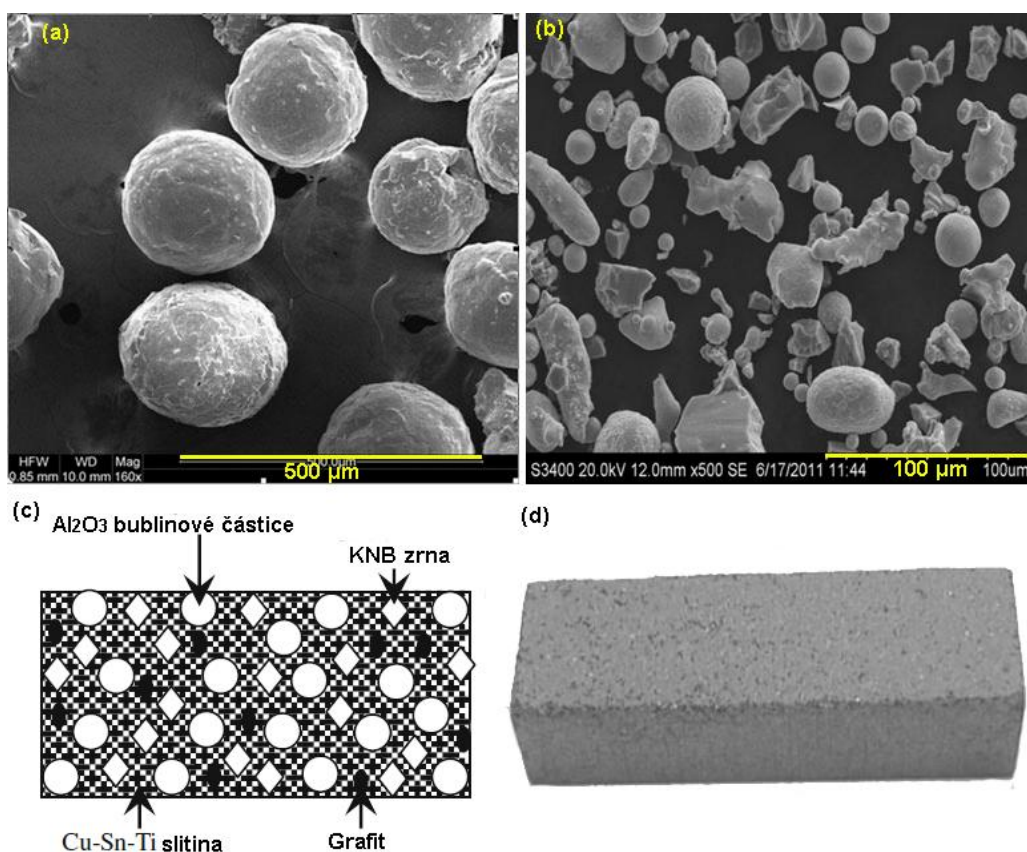
- možnost obrábění tvrdých materiálů, které jsou klasickými brusivy těžko obrobitelné nebo neobrobitelné,
- zlepšení hospodaření s odpady (vodou),
- vysoký výkon broušení,
- vysoká produktivita práce,
- vysoká životnost,
- stálost tvaru kotouče,
- zlepšení pracovních podmínek.

Aby došlo k optimálnímu využití vlastností kotoučů, je nutno volit vhodnou charakteristiku kotouče za použití doporučených podmínek [49]. Brousicí kotouč s brusivem z KNB je charakterizován těmito základními znaky [50]:

- druh brusiva,
- tvar kotouče,
- rozměr kotouče,
- druh pojiva,
- zrnitost brusiva,
- koncentrace brusiva.

Brousicí kotouče z KNB se používají k ostření řezných nástrojů, broušení tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů či pro tvarové broušení do plného materiálu [49,50]. Mnoho vědců se přitom ve svých studiích zabývalo opotřebením těchto brousicích kotoučů [51,52,53,54] nebo výslednou jakostí obrobeného povrchu [55,56]. Herman [51] svůj výzkum zaměřil na radiální opotřebení velmi tvrdých brousicích kotoučů

z KNB při procesu vnitřního broušení ložiskových kroužků. Vyvinul brousicí kotouč, přičemž pro lepení zrn submikrokryсталického nitridu boru použil skleněno-keramické pojivo. V porovnání s komerčně prodáváním kotoučem s keramickým pojivem byl tento nový schopný obrábět s vyšší jakostí obrobeného povrchu při jeho menším opotřebení. Jackson [57] ve své studii zvažoval možné vitrificační tepelné zpracování brousících kotoučů z KNB. Ukázalo se, že vitrificační tepelné zpracování pojiv má zásadní vliv na výsledné opotřebení brousícího kotouče. Ding [58] se zabýval výrobou brousících kotoučů z KNB s použitím bublinových částic oxidu hlinitého jako činidel tvořících póry a slitiny Cu-Sn-Ti jako pojivového materiálu. Vliv pórovitosti na mechanickou pevnost pórovitých kompozitních kotoučů byl zkoušen tříbodovým ohybovým testem. Výsledky ukazují, že pevnost v ohybu pórovitých kotoučů se pohybuje od 51 do 103 MPa při změně pórovitosti z 8 na 45 %. Vysoká pevnost kotoučů je dána hlavně pevným spojením vytvořeným na slinovacím rozhraní zrn Cu-Sn-Ti / KNB a částic Cu-Sn-Ti / Al_2O_3 , což je znázorněno na obrázku 3.9.



Obr. 3.9 (a) Al_2O_3 bublinové částice, (b) Cu-Sn-Ti slitina, (c,d) schématické a morfologické zobrazení brousícího materiálu [58].

3.7 Proces broušení a jeho identifikace

Operace broušení je využívána při zajišťování vysokých požadavků na jakost výrobků, na jejich rozměrovou a tvarovou přesnost i jakost povrchu. Při identifikaci procesu broušení je třeba se zaměřit na hodnocení průběhu jeho stability a na situace, kdy tato

stabilita je narušena. Tento postup se stává významným při broušení součástí, jako jsou např. ložiska, vačkové hřídele a všechny součásti přesných rozměrů.

Chyby, které nastanou při broušení se projeví na broušeném povrchu, a to v jeho textuře a geometrickém tvaru, protože všechny tyto úchytky jsou ovlivněny celým systémem broušení, který probíhá za stabilních a nestabilních podmínek. Pro pochopení stavu tohoto procesu je nutné vyjít ze systémového přístupu, kterým je interakce konstrukce stroje, nástroje a obrobku. Tyto složky totiž významně určují meze pro výslednou jakost broušeného povrchu.

Teoretické práce, které se zabývaly procesem broušení, rozebíraly a hodnotily tento proces především z hlediska tvoření a oddělování třísky [62,63,64]. Avšak malá pozornost byla věnována procesu plastické deformace, která probíhá za extrémních podmínek zatěžování, tj. za vysokých měrných tlaků, za vysokých teplot a za vysoké deformační rychlosti. Všechny tyto vlivy se projeví především na změnách vlastností broušeného povrchu, když tento vstupuje do pásma styku s brousicím kotoučem. To jsou skutečnosti, které je nutné poznávat a odhalovat. Je to úkol velice obtížný zejména proto, že hodnocení plastické deformace a všech průvodních jevů je velmi nesnadné. Je tedy nutné zaměřit pozornost na hodnocení broušeného povrchu. Na něm je možné najít informace nejen o tom, jak broušený povrch vzniká, ale také to, jaké vlastnosti měl stroj, na kterém obrábění probíhalo [59]. Kukie [65] ve své studii řešil fyzikální a matematické modely deformací a přenos tepla v procesu broušení, přičemž zaktualizoval Lagrangeovy formulace. Dále k získání řešení použil metodu konečných prvků a dynamické explicitní metody.

Druhou oblastí, která může poskytnout informace o procesu broušení, je snímání vibrací stroje, kterým se zabývalo několik vědců [68,69]. Toto samo o sobě nemůže vypovědět všechno o procesu broušení. Spojí-li se však hodnocení chvění celého technologického systému s hodnocením textury povrchu po broušení, je to cesta, která může přispět k lepším znalostem o procesu broušení. Vzhledem k tomu, že opotřebení brousicího kotouče má přímý vliv na vibrace obrobku a oba mají vliv na kvalitu obrobku, hlavním cílem práce Hassuiho [66] bylo studovat vztah mezi vibračními signály procesu a kvalitou obrobku (jakost povrchu, kruhovitost). Hlavním závěrem jeho práce bylo, že možné získat dobrou kvalitu obrobku dokonce s jistou úrovní vibrací, která je mnohem vyšší než úroveň získaná z nedávno ořezaného kotouče. Převážná většina modelů vibrací při broušení předpokládá, že nedochází k torzním vibracím, proto se Mannan [67] právě touto problematikou zabýval a dále ji zkoumal. V jeho studii byl vyvinut model kmitočtové domény pro proces broušení, který zahrnoval torzní účinky. Dospělo se k závěru, že pro předpokládaný model sil při broušení může být chvění ovlivněno torzními vlastnostmi jak obrobku, tak systémů kotoučů. Dále popisuje, jak se síly při broušení mění s oscilační rychlostí obrobku a oscilační tloušťkou třísky. V konstrukci moderních strojů a zařízení, v energetice, v letecké a dopravní technice, kde se stále více uplatňují materiály s vyššími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, se dá očekávat, že vliv technologie výroby a její účinek na vlastnosti povrchové vrstvy se bude projevovat stále výrazněji. Je to způsobeno vyšší hodnotou deformační práce

a teplotou v místě tvoření třísky, často horší tepelnou vodivostí použitých materiálů a také vyššími mechanickými vlastnostmi. Všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součásti, lze shodně posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se potom mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity [60].

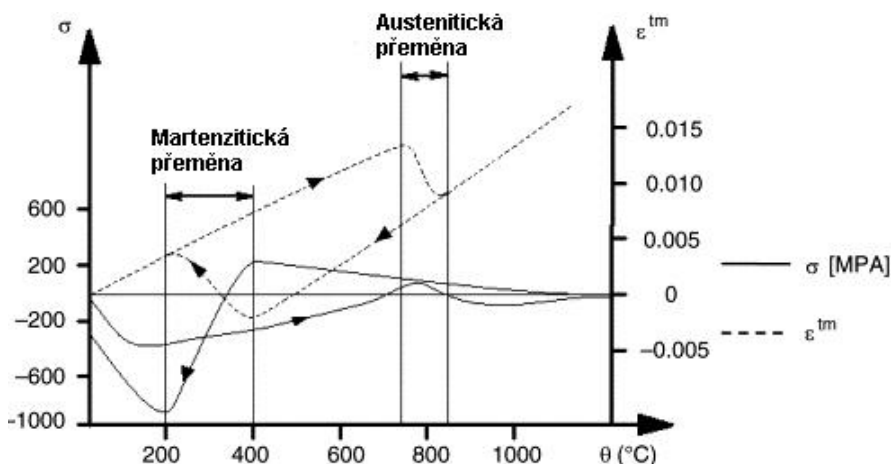
Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.

Při posuzování vlivu technologických procesů na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku při jeho výrobě je možné vycházet z druhu a intenzity energií, které se na jeho realizaci podílejí. Jedná se o energii mechanickou, tepelnou a chemickou. Je však nutné brát v úvahu i vlivy metalurgické, fyzikální a také vlastnosti materiálu. To všechno ovlivňuje vznik zbytkových napětí. Hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí jsou:

- nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu,
- nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu, které vyvolává jeho roztažení a smršťování,
- nerovnoměrné změny struktury vyvolané působením tepla a mechanických sil,
- chemické procesy spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy [61].

Každá technologická operace dosahuje přestavby zbytkových napětí svým vlastním způsobem jen v takovém objemu materiálu, v jakém je schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit. Při obrábění je podstatou vzniku zbytkových napětí pružně plastická deformace v oblasti tvoření třísky. Důležitým faktorem je doba působení vlivů podmínek řezání a rychlost změn probíhajících stavů. To se výrazně projevuje např. při broušení, kdy ohřev je velmi rychlý a krátkodobý, rychlost ohřevu i doba chladnutí probíhají za extrémních podmínek. I když na jakost povrchové vrstvy má největší vliv poslední operace, může při nevhodně zvoleném sledu operací zůstat v povrchové vrstvě zachován vliv z operací předchozích. Byla publikována řada hypotéz o účinku zbytkových napětí na únavovou pevnost [70,71]. Jejich závěry, zkušenosti z praxe a výsledky experimentů výzkumu se shodují s tím, že tahová zbytková napětí únavovou pevnost snižují a tlaková zbytková napětí je naopak zvyšují. Hamdi [72] se ve své studii zabýval obecně uznávaným předpokladem, že konvenční broušení způsobuje tahová zbytková napětí, zatímco tlaková napětí vznikají při vysokorychlostním broušení. Z toho důvodu vytvořil termomechanický model konečných prvků pro výpočet zbytkových napětí vzniklých procesem povrchového broušení ocelového obrobku z materiálu AISI 52100. Ukázalo se, že pro takové podmínky broušení simulace vede k tahovým zbytkovým namáháním. Výpočet navíc ukazuje, že teplota v oblasti broušení se zvyšuje i při zvyšování obvodové rychlosti brousícího kotouče. Tudíž se očekává, že při rychlostech odpovídající vysokorychlostnímu broušení $> 120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ může povrchová teplota dosáhnout hodnot

vedoucích k austenitické přeměně, a proto během chlazení může být obrobek vystaven povrchovému ochlazení vedoucímu ke vzniku tlakových zbytkových napětí (viz obr. 3.10).



Obr. 3.10 Vliv metalurgické přeměny na zbytkové napětí kde: θ [°C] je teplota v bodě styku kotouče a obrobku, σ [MPa] je zbytkové napětí, ε^{tm} [-] část sil po broušení vstupujících do obrobku [72].

3.8 Hodnocení zbytkových napětí

Přítomnost zbytkových napětí výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu, konkrétně jeho únavové vlastnosti. V současné době se využívají různé způsoby měření zbytkových napětí. Jedná se o metodu odvrtávání nebo metodu rentgenové (RTG) difrakce. Metoda odvrtávání je nicméně destruktivní. Obě uvedené metodiky vyžadují dosti značný čas pro hodnocení, zvláště na velkých součástech [73].

Metoda zjišťování zbytkových napětí pomocí Barkhausenova šumu se ukazuje jako další významná metodika pro hodnocení zbytkových napětí na součástech dokončených různými technologickými operacemi [76]. Moorthy [77] ve svém článku zkoumal účinky změn zbytkových napětí způsobených broušením pomocí magnetické emise Barkhausena u oceli En36, přičemž měření vysokého i nízkého kmitočtu byla provedena na vzorcích o průřezu 0,55 a 0,8 mm. Měření dle Barkhausena s vysokým i nízkým kmitočtem byla korelována s profilem zbytkového napětí měřeným metodou rentgenové difrakce. Vysokofrekvenční měření dle Barkhausena indikovalo změny zbytkového napětí na povrchu vzorků, ale nezaznamenávalo změny v hloubkách větších než 10 μm . Nízkofrekvenční profil však již určil změny zbytkového napětí i pod povrchem. Vashista [78] provedl experimentální studii, která zkoumala úlohu procesních parametrů při vysokorychlostním broušení (brousicí kotouč z KNB) středně uhlíkové oceli s důrazem na integritu povrchu. Povrchové zbytkové napětí na vyrobených vzorcích bylo vyhodnoceno rentgenovou difrakční technikou a analýzou šumu Barkhausen. Výsledkem studie bylo vytvoření lineární korelace mezi parametry Barkhausenova šumu, zbytkovým napětím a teplotou při broušení, přičemž parametry Barkhausenova šumu stoupaly s nárůstem parametrů obrábění.

Studium vlastností povrchové vrstvy napomáhá hodnocení vlivů technologických procesů a pracovních podmínek na jakost, tj. na vlastnosti povrchové vrstvy a na zbytková napětí. Aby bylo možné doložit správnost názorů na řešenou problematiku a dát k dispozici konkrétní výsledky, je nutné provádět funkční zkoušky (např. únavové zkoušky, zkoušky tření, apod.), kde různé způsoby dokončení funkční plochy lze využít pro stanovení její jakosti a stavu zbytkových napětí [74, 75].

Tyto poznatky se potom promítnou do odolnosti součástí při jejich namáhání a ovlivní jejich spolehlivost a životnost, stejně jako povedou k upřesňování pracovních podmínek, za kterých funkční plocha vznikala.

Metoda měření pro hodnocení jakosti povrchové vrstvy po technologických operacích využívající Barkhausenův šum nachází své uplatnění nejen při hodnocení zbytkových napětí, ale i při hodnocení změn mikrostruktury po tepelném zpracování [76].

4 INTEGRITA POVRCHU PO BROUŠENÍ KALENÝCH OCELÍ S VYUŽITÍM BARKHAUSENOVA ŠUMU

Nositelem kvalitativních charakteristik v procesu obrábění je obrobek. Geometrie obrobené součásti se liší od ideální geometrie zadané výkresem, protože na reálně obrobené ploše jsou mikronerovnosti. V důsledku působících sil při obrábění se tenká povrchová vrstva pod obrobenou plochou deformuje. V důsledku deformace a ohřívání povrchové vrstvy vznikají v této vrstvě napětí a mění se i její fyzikálně-mechanické vlastnosti. Protože všechny tyto skutečnosti ovlivňují funkční vlastnosti obráběné součásti, je třeba stav a jakost obrobené plochy neustále sledovat a vyhodnocovat.

4.1 Kvalita obrobeného povrchu

Kvalita povrchu, představuje společnou charakteristiku strojních součástí, která je dána:

- geometrií obrobeného povrchu – rozměrová přesnost obrobků, odchylky geometrického tvaru a polohy, vlnitost a topografie,
- fyzikálně-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy – tvrdost, zpevnění a zbytkové napětí,
- fyzikálně – chemickým stavem povrchu.

Stav a kvalita povrchové vrstvy obráběného materiálu ovlivňují únavovou pevnost, odolnost proti opotřebení, protikorozní stabilitu, kvalitu lícování, apod. Stav a kvalita povrchové vrstvy jsou velmi důležité aspekty, zejména pro dynamicky namáhané součásti, které začínají být narušovány zpravidla od povrchu. Do kvality povrchu charakterizované fyzikálně-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy a fyzikálně - chemickým stavem povrchu patří:

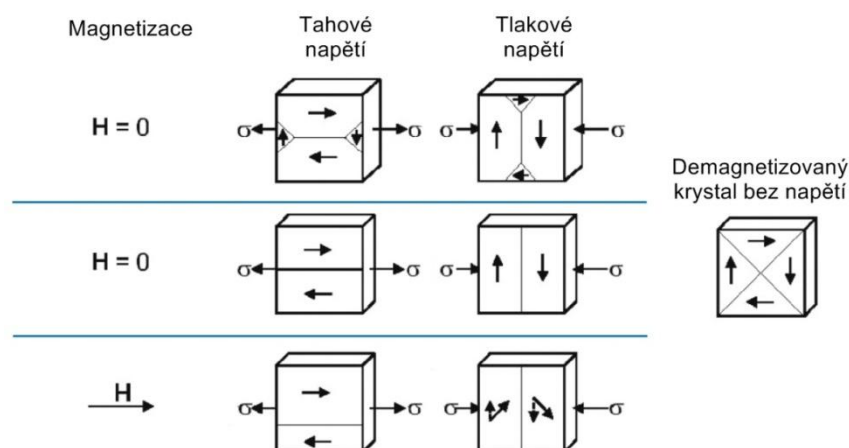
- zpevnění obrobeného povrchu dané mikrotvrdostí,
- zbytkové napětí,
- vznik trhlinek v obrobeném povrchu,
- strukturní změny,
- změny chemického složení,
- plastická deformace,
- opal povrchu a jiné.

K identifikaci kvality (integrity) povrchu je možné použít celou řadu metod, přičemž každá má své výhody i nevýhody spojené s její citlivostí, přesností, časem potřebným na změření veličiny, cenou zařízení, jeho provozem. Jednou z nedestruktivních magnetických metod je i metoda Barkhausenova šumu. Tato metoda se využívá

především na monitorování stavu povrchu po technologických operacích jako je broušení a zpevňování povrchů. Mezi její hlavní výhody patří rychlost (odezva z povrchu v sekundách až milisekundách), adaptovatelnost na různé tvary povrchů, přenosnost systému a jeho možná integrace do automatizovaných cyklů a robotických buněk. Za nevýhody lze považovat to, že signál je závislý od mnoha proměnných jako je druh materiálu, zakřivení povrchu, tvar sondy jakož i to, že je možné ji využít pouze pro feromagnetické materiály [76].

4.2 Teorie Barkhausenova šumu

Nespojitost změny magnetizace při spojitě změně budicího magnetického pole, známá jako Barkhausenův jev nebo šum, je známá již od roku 1919. Na testování materiálů se však začala využívat až od poloviny 20. století. U feromagnetických materiálů je Barkhausenův signál vyvolán změnami v magnetizaci, které jsou způsobeny pohybem magnetických stěn domén. Tyto pohyby stěn domén jsou vyvolány přivedením časově proměnlivého magnetického pole do materiálu součásti, které nutí stěny domén hledat nové rovnovážné polohy. Příznivě orientované domény rostou na úkor domén druhých. Během růstu se mohou pohybující stěny domén zastavit na hranicích zrn, u vměstků a/nebo se soustředit u dislokací. To vede k nepravidelnému pohybu, čímž vzniká signál označovaný jako Barkhausenův šum. Amplituda Barkhausenova šumu závisí na napětí a na mikrostruktuře. U ocelí s kladnou magnetickou konstantou existuje oblast, kde pružná tahová napětí ve směru magnetizace zvyšují amplitudu Barkhausenova šumu, zatímco tlaková napětí ji snižují. Tahová napětí mohou zvyšovat počet pohybujících se stěn domény, dezorientovat nebo modifikovat bránící překážky. Tlaková napětí na druhé straně podporují pohyb tvoření konců domén snížením počtu doménových stěn. Amplituda Barkhausenova šumu je také citlivá na mikrostrukturu materiálu. Mikrostruktura totiž určuje hlavní uspořádání a charakteristiky uspořádání domén. Je celkem dobře zdokumentováno, že pohyb domén je brzděn hranicemi zrn a jinými rozhraními [79,80]. Již dříve bylo dobře známo, že koercitivita (nebo jinak koercitivní síla H_c), magnetická saturace a remanentní magnetismus, které je možné určit z hysterezní smyčky, výrazně ovlivňují tvrdost, či napěťový stav, jak je znázorněno na obr. 4.1.



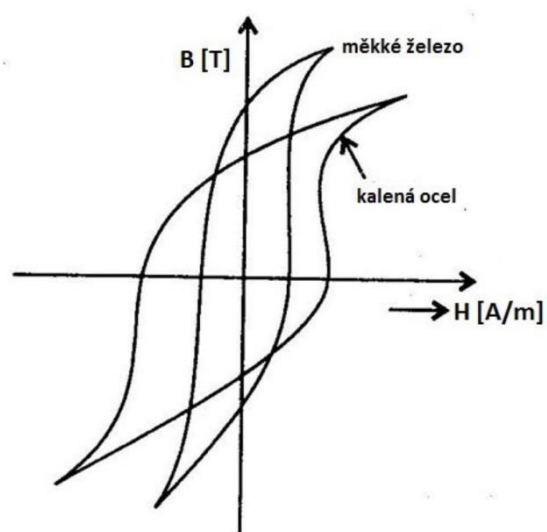
Obr. 4.1 Vliv vnějších faktorů na změnu struktury magnetických domén [81].

Obr. 4.1 ukazuje vliv napětí na změnu hustoty elastické energie. Feromagnetický materiál reaguje na nárůst hustoty elastické energie změnou tvaru s cílem minimalizovat vnitřní energii. Tato reakce se nazývá magnetoelastická odezva na mechanicky indukované napětí. Vlivem zatížení tahovými napětími oblasti, u nichž je směr magnetizace rovnoběžný se směrem zatížení rostou, pokud oblasti, u nichž je směr magnetizace kolmý na směr zatížení se zmenšují až úplně zaniknou. Vlivem zatížení tlakovými napětími je efekt opačný, oblasti u nichž je směr magnetizace kolmý na směr zatížení se zvětšují [82].

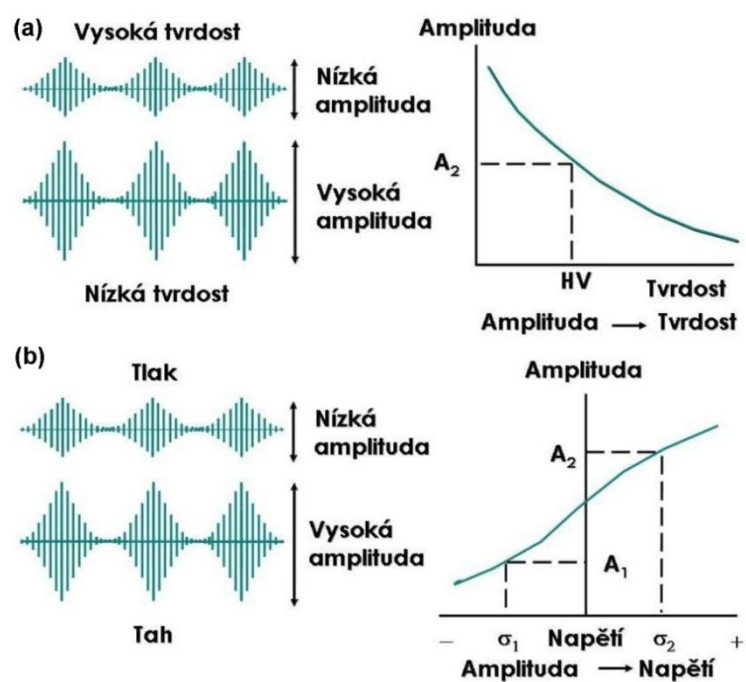
Při externí magnetizaci s orientací rovnoběžnou se směrem tahových napětí se zvětšují oblasti s orientací rovnoběžnou se směrem magnetizace. Další zvětšování excitačního pole vede k zániku oblasti s orientací kolmou na směr magnetizace. Efekt rovnoběžné orientace vlivem superpozice tahových napětí a magnetizace tak vede k zintenzivnění pohybu Blochovy stěny. Při zatížení tlakovým napětím magnetizace způsobuje rotaci oblastí ve směru excitačního pole. Proto je efekt na Blochovu stěnu opačný a eliminuje pohybovou aktivitu stěny [84].

Tento jev může být použit na vysvětlení hysterezní smyčky ve feromagnetických materiálech (obr. 4.2). Se vzrůstající excitací se domény natáčí do směru magnetického toku. Nevratné pohyby Blochovy stěny vedou ke zbytkové magnetizaci zvané remanence. Na její eliminování je třeba pole intenzity H_c (koercitivní síla). Přítomnost napětí vede k deformaci hysterezní smyčky, což je znázorněno na obr. 4.3(a). Blochovy stěny, které oddělují feromagnetické domény s různou magnetickou orientací, se vlivem externího magnetického pole hýbou. Tento pohyb je možné indikovat malou cívkou z elektricky vodivého drátu jako elektrický puls. Změna magnetizace není kontinuální, ale pohyb Blochových stěn je charakteristický skoky - Barkhausenův šum (obr. 4.3 (b)).

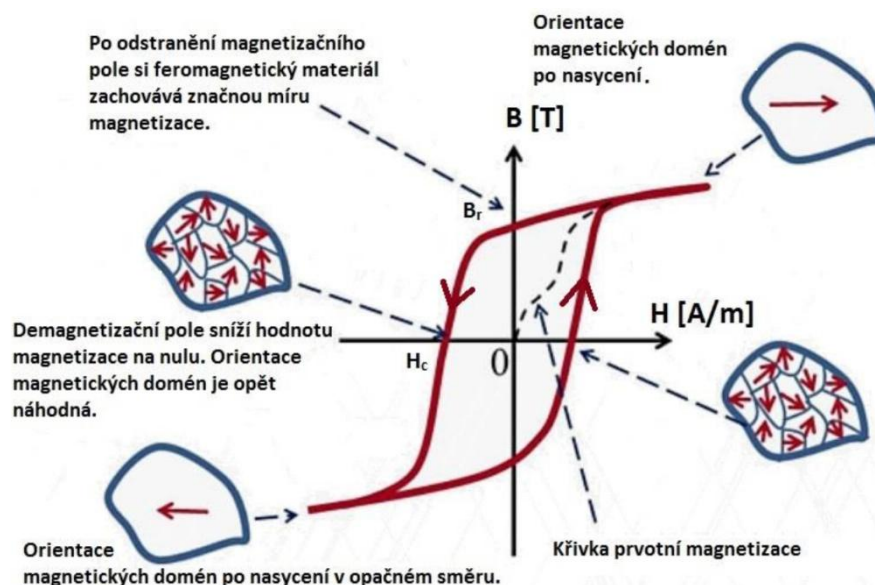
Barkhausenův šum je tlumen do hloubky. Hlavní příčinou je tlumicí efekt, tzv. eddy proudu [86], který ovlivňuje elektromagnetická pole pohybujících se Blochových stěn. Při zatížení napětím se Blochovy stěny natáčí vlivem směřování magnetického toku. Pak tlaková napětí ve feromagnetickém materiálu snižují intenzitu Barkhausenova šumu a tahová ho zesilují, jak je zobrazeno na obr. 4.3(b) a 4.4. Také tvrdost struktury ovlivňuje Barkhausenův šum, jak je znázorněno na obr. 4.3(a). K identifikaci různých aspektů povrchu obrobků je třeba zvážit, jaký parametr Barkhausenova šumu využít. Obr. 4.4 poukazuje na skutečnost, že velikost napětí může být analyzována i tvarem hysterezní smyčky, respektive její deformace ve srovnání s tvarem bez účinku napětí [84,85].



Obr. 4.2 Hysterezní magnetická smyčka feromagnetických materiálů [82].



Obr. 4.3 Vlivy na charakter Barkhausenova šumu (a) vliv tvrdosti, (b) vliv napětí [81].



Obr. 4.4 Orientace magnetických domén v průběhu magnetizace včetně hysterezní křivky [83].

Celé zařízení je založeno na senzoru s integrovaným budícím a detekčním zařízením. Magnetické pole je buzené magnetem v blízkosti povrchu. Snímač je malá cívka detekující elektrické pulzy vlivem pohybu Blochovy stěny. Tyto dva systémy jsou integrovány do senzoru s kontaktní plochou přibližně 16 mm^2 . Hloubka penetrace se může měnit prostřednictvím změny analyzovaných frekvencí. Na analýzu integrity povrchu mohou být použity různé parametry. Především při aplikaci Hallové sondy je možné detekovat nejen koercitivitu, ale i deformaci tangenciálního magnetického pole H . Je to jedna z možností jak rozšířit sortiment analyzovaných parametrů. Deformace tangenciálního magnetického pole se doporučuje například na určení hloubky a intenzity zpevnění povrchu. Při aplikaci další cívky integrované do senzoru představuje systém eddy multifrekvenční analyzátor. Čas měření je velmi krátký. Během několika vteřin je možné získat velký počet parametrů. Na druhou stranu je třeba celý měřicí systém adaptovat na tvar povrchu. Měření je možné provádět i přes vrstvu, která není feromagnetická [82].

4.3 Určování zbytkových napětí

Jakost povrchové vrstvy obrobku je charakterizovaná druhem a velikostí určitých změn vyvolaných technologickým procesem. Tyto změny se projevují na:

- povrchu obrobku plochy v jeho morfologii,
- povrchové vrstvě a pod jejím povrchem.

Jedním z důležitých ukazatelů jakosti povrchové vrstvy součásti je také průběh zbytkových napětí, která jsou vyvolána výrobním procesem a jeho příčinami, jako je:

- nerovnoměrná plastická deformace,
- nerovnoměrný ohřev nebo ochlazení,

- nerovnoměrné změny struktury způsobené vlivem tepla a řezných sil,
- chemické procesy, zejména absorpce a difuze.

Každá technologická operace způsobuje přestavbu zbytkových napětí v důsledku vlastního mechanismu do takové hloubky, do které je schopna vyvolat plastické deformace. V ostatním objemu materiálu nastávají pružné deformace a dochází zde k superpozici napětí vyvolaných předchozími operacemi [87].

Z toho vyplývá závažnost znalostí a navržení vhodného postupu výroby včetně tepelného zpracování tak, aby bylo možné zaručit, že opracovaná plocha bude mít požadované vlastnosti.

V reálných součástech se však vyskytují současně všechny druhy zbytkových napětí. Z hlediska studia vlastností povrchových vrstev po obrábění jsou nejvíce významná zbytková napětí 1. druhu. Jejich znalost slouží k optimalizaci a predikci funkčních vlastností obrobených součástí. Všechny metody zjišťování zbytkových napětí je možné rozdělit na destruktivní a nedestruktivní [75]. Metody zjišťování zbytkových napětí je možné také rozdělit podle způsobu určování napětí na analytické neboli výpočtové a experimentální.

Destruktivní metody jsou založeny na měření deformace při odstraňování vrstvy materiálu se zbytkovým napětím. Polo-destruktivní metody umožňují použít součásti i po jejich měření. Nedestruktivní metody neovlivňují součást při jejím měření.

Podle principu je možné metody měření zbytkových napětí rozdělit na:

- mechanické (měření deformace)
- fyzikální (měření změn vlastností)
- chemické (změny vyvolané chemickými procesy).

Podle charakteru měřené veličiny se jedná o metody:

- přímé
- nepřímé – zbytková napětí se určí podle změny jiných veličin [75].

Zjišťování zbytkových napětí se provádí buď v těsné blízkosti od povrchu nebo v celém průřezu součásti. Podle napjatosti je možné měřením stanovit napjatost prostou, rovinnou nebo prostorovou. Přehled metod pro zjišťování zbytkových napětí je uveden v tab. 4.1.

Mechanické metody stanovení zbytkových napětí jsou založeny na měření deformace vyvolané porušením rovnováhy vnitřních napětí při odstranění částí objemu (vrstvy) součásti, tj. porušením její celistvosti. Ze změřené deformace se stanovuje průměrná hodnota napětí. Nevýhodou těchto metod je poškození součástí a určení pouze průměrných hodnot napětí 1. druhu. Některé metody oddělování vrstev nebo částí vzorku mohou vyvolat přidavná napětí, která potom zkreslují výsledek měření. Jednotlivé metody se od sebe liší tvarem zkušebních vzorků, metodou výpočtu a možnostmi stanovení jednoosé nebo víceosé napjatosti [87].

Tab. 4.1 Metody zjišťování zbytkových napětí [75]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
			rozříznutí
		kroužek	změna křivosti
			podélné pásy z kroužků
			obecný tvar
	křehké laky	vznik trhlin	
	křehké modely	vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální		šíření vln	změna rychlosti
Ultrazvuk			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

Složky napětí pro stanovení stavu napjatosti a přetvoření měřené součásti se nedají měřit přímo, ale z jejich projevů. Nejčastěji to bývá poměrná deformace (poměrné prodloužení ε). Pomocí vztahů mezi napětím a deformací lze určit napjatost ve sledovaném místě. K tomu je ale nutná znalost materiálových konstant jako je modul pružnosti a Poissonovo číslo.

5 PROVEDENÝ EXPERIMENT

Cílem byla analýza aspektů strategií soustružení a broušení při použití rozválcování za studena a soustružení před tepelným zpracováním. Dále byl posuzován vliv využití válcování za studena jako konkurenční strategie k soustružení při výrobě kroužků ložisek ve stavu žíhaném a jeho vliv na následující operace a na výslednou kvalitu obrobků. Pro následující analýzy byly použity vzorky uvedené v tabulce 5.1, kde jsou přesně popsány jednotlivé technologické operace na nich provedené. Dále pod tabulkou je v popisu přesně specifikován postup jejich výroby včetně použitých strojů i nástrojů.

Tab. 5.1 Tabulka jednotlivých vzorků a jejich technologické operace

Číslo vzorku	Technologie zpracování před TZ	Technologie zpracování po TZ
1	polotovár soustružený	broušení
2	polotovár soustružený	soustružení
3	polotovár rozválcovaný	broušení
4	polotovár rozválcovaný	soustružení
5	polotovár rozválcovaný	
6	polotovár soustružený	

Materiál: 100Cr6

Rozměry: vnější průměr 140 mm a vnitřní 127,3 mm (2 oběžné dráhy)

Soustružení před TZ: $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, řezná destička DNMG 160612-TF, řezná kapalina Ecocool SNK GTG 5%, rozměry polotovaru 143x122x36,5 mm.

Rozválcování před TZ: rozválcováno na stroji URWA 160, síla rozválcování 390 kN, $n = 350 \text{ min}^{-1}$, posuv 1,1 mm, čas rozválcování 6s, rozměry polotovaru 89,2x68,7x32,3 mm.

Režim TZ (kalení a popouštění): ohřev na austenitizační teplotu 840 °C na 30 minut a kalení do oleje Durixol V35C při teplotě 60 °C. Následné popouštění při teplotě 160 °C během 2 hodin.

Soustružení po TZ: soustružené nástrojem DNGA 150408 z KNB (TiN povlak), $t = 0,07 \text{ mm}$. Řezné podmínky: $v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 0,12$ a $0,05 \text{ mm}$, za sucha, soustruh MIKROTURN 100 CNC.

Broušení: brousicí kotouč 518AN70/02JOT/K84V25A (2406 RPM, BUTSABACHER), broušení zápichem, orovnění před každým kusem, podmínky orovnění $a_p = 0,02 \text{ mm}$; otáčky brousicího kotouče ($D = 500 \text{ mm}$) = $1400 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_c = 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, přidavek ,2 mm, otáčky obrobku 50 min^{-1} ,

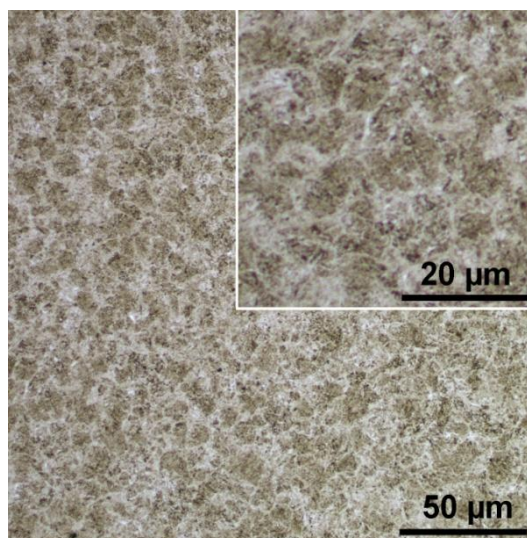
řezná kapalina Opticcol, výrobce Chesterton, bruska JUNKER, čas cyklu 2,27 min.

Kde: n jsou otáčky obrobku; v_c je řezná rychlost; a_p je šířka záběru hlavního ostří nástroje; f je posuv na otáčku; t - tloušťka povlaku; D - průměr broušícího kotouče.

5.1 Analýza mikrostruktury a podpovrchové vrstvy

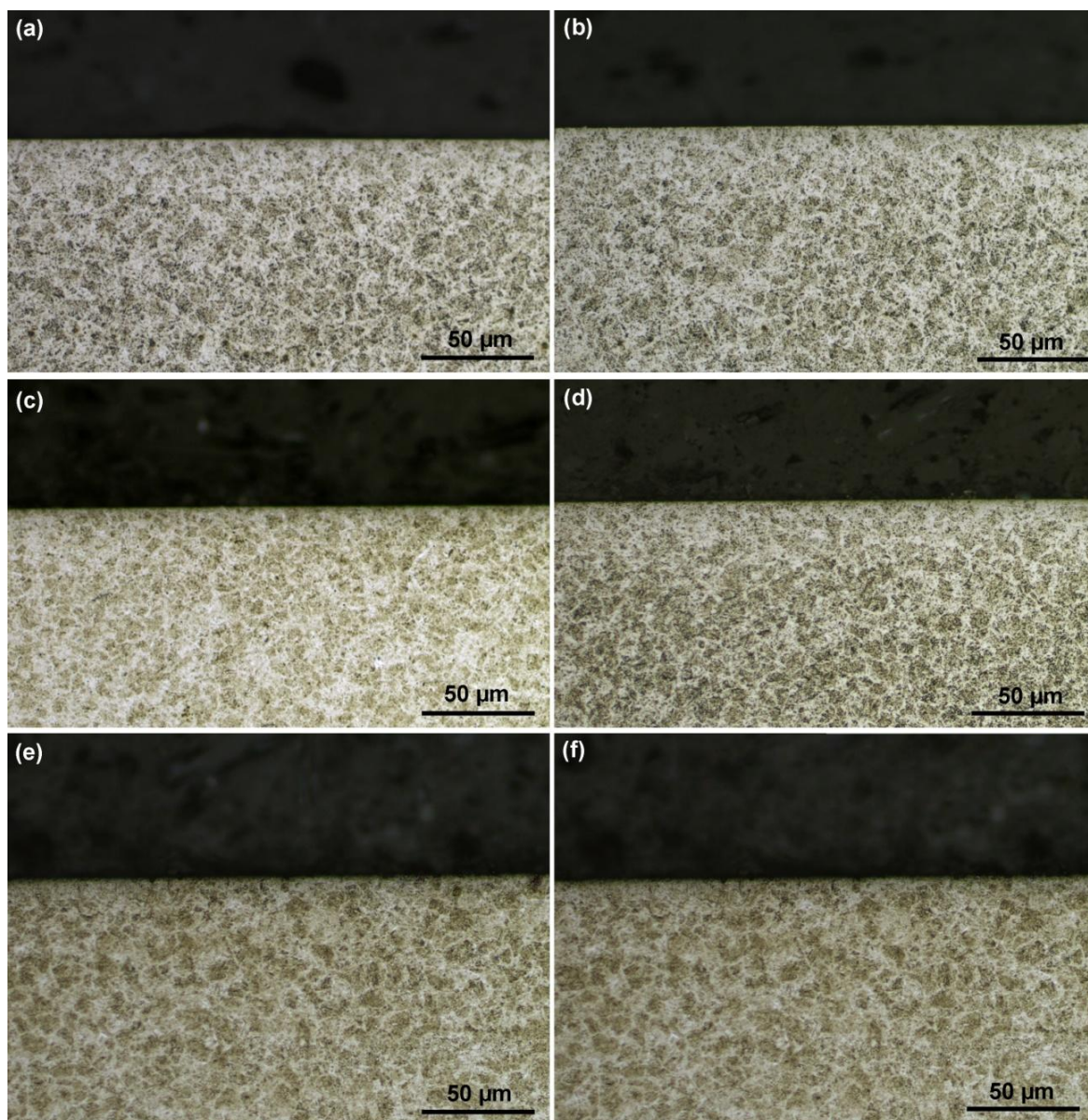
Pro analýzu mikrostruktury a podpovrchové vrstvy byly ze středu (co se týká šířky oběžné dráhy) vyřezány na elektroerozivní drátové řezačce vzorky o délce cca 2 mm pro všechny analyzované stavy.

Vzorky byly vyřezány tak, aby analyzovaná plocha byla rovnoběžná se směrem soustružení, resp. rozválcování (podélný řez, směr vektoru řezné rychlosti). Metalografické preparáty byly připraveny běžnými technikami – broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami pomocí automatického preparačního systému. Finální mechanicko-chemické doleštění bylo provedeno pomocí suspenze OP-Chem. Po naleptání leptadlem Nital, byla struktura materiálu pozorována a dokumentována pomocí elektronové (SEM) a světelné mikroskopie (LM). Mikrostruktury materiálu po tepelném zpracování je zobrazena na obrázku 5.1.



Obr. 5.1 Mikrostruktura vzorků.

Analýza příčného řezu povrchu po soustružení (obr. 5.2 (f)) před TZ ukazuje, že obrobený povrch je bez výraznějších změn. Na povrchu se nenachází viditelná strukturně přetvořená vrstva. Povrch je bez viditelné textury či preferenční orientace a povrchová vrstva – feritická matrice – je obdobná, jako je feritická matrice nacházející se v hlubších vrstvách pod povrchem, resp. v jádře.



Obr. 5.2 Příčné řezy vzorky (LM) (a) vzorek č.1 polotovár soustružený a po TZ broušený, (b) vzorek č.2 polotovár soustružený a po TZ soustružený, (c) vzorek č.3 polotovár rozválcovaný a po TZ broušený, (d) vzorek č.4 polotovár rozválcovaný a po TZ soustružený, (e) vzorek č. 5 polotovár rozválcovaný před TZ, (f) vzorek č. 6 polotovár soustružený před TZ.

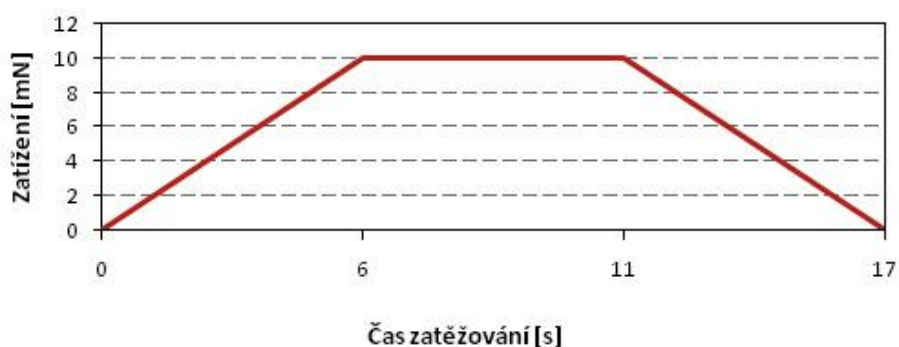
V souvislosti s válcováním za studena je možné konstatovat, že mikrostruktura v podpovrchové oblasti pro válcování za studena je obdobná jako v případě soustružených kroužků (obr. 5.2 (f)). Na druhé straně se válcováním za studena vytváří výrazně preferenční usměrnění feritické matrice do směru válcování (obr. 5.2 (e)). Jednotlivá zrna jsou protažena v tangenciálním směru (ve směru paralelním s povrchem), přičemž v tenké vrstvě na povrchu se vytváří stagnační zóna, kde je preferenční usměrnění matrice méně výrazné, resp. není viditelné v důsledku tření mezi vytvářeným povrchem a nástrojem při válcování.

Po kalení a následném popouštění se vytváří struktura tetragonálního martenzitu, což je patrné z obrázků 5.2 (b,c), které ukazují dva základní aspekty. Prvním je skutečnost, že mezi oběma strategiemi není po TZ viditelný zjevný rozdíl v mikrostruktuře. Je to dáno tím, že během ohřevu na austenitizační teplotu a především během výdrže na této teplotě, dochází k rekrytalizaci feritu na austenit. Stejný stav mikrostruktury po TZ je tedy daný stejným režimem TZ pro obě strategie. Druhým aspektem je skutečnost, že v případě obou strategií jsou viditelné zjevné rozdíly v makrostruktuře povrchových vrstev. Některá pozorovaná místa ukazují, že povrch i hlubší vrstvy pod povrchem, se obě jeví jako tmavé oblasti. Avšak na jiných místech se objevují na povrchu bílé zóny tloušťky do 15 μm , jejichž vlastnosti budou odlišné od hlubších vrstev pod povrchem. Takovýto charakter struktury je společný pro obě strategie.

V případě soustružených vzorků po TZ jsou opět rozdíly ve strategiích (soustružení a rozválcování) minimální. Metalografická analýza neindikuje výraznější rozdíly. V případě broušení se na povrchu nachází poměrně tenká tepelně popuštěná oblast (tmavší zóna pod povrchem), a to pro obě strategie využívané před TZ. Její tloušťka indikuje poměrně nízké tepelné zatížení broušeného povrchu a ukazuje také na to, že řezné podmínky (a také ostatní podmínky broušení) jsou zvoleny správně (tento aspekt potvrzuje také charakter zbytkových napětí, kdy se v povrchu nacházejí především tlaková napětí). Vzhledem k tomu, že broušící kotouč byl před samotným broušením orovnaný a také s ohledem na krátký cyklus broušení (2,27 min.), je vliv opotřebení brusného kotouče na tepelné zatížení povrchu zanedbatelný. Na druhé straně, v případě obou strategií je vidět, že tepelné popouštění není na povrchu rozložené rovnoměrně a tloušťka tepelně ovlivněné oblasti, resp. její výskyt, se mění. Obzvláště je tento aspekt výrazný v případě kroužků připravených před TZ strategií soustružení (jak je patrné z obr. 5.2(a)).

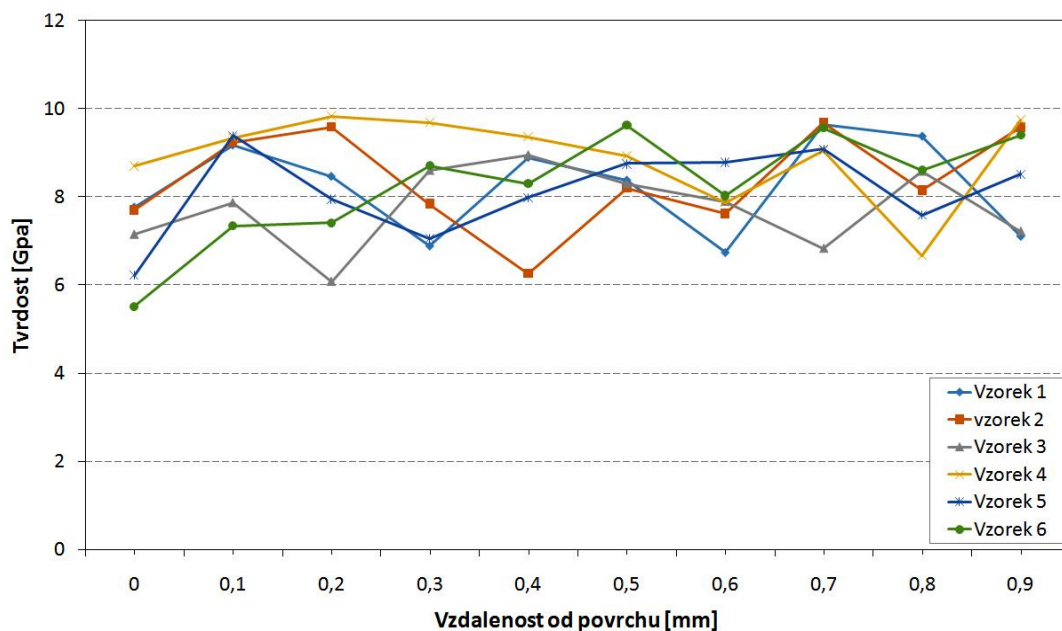
5.2 Analýza mikrotvrdosti podpovrchové vrstvy

Analýza mikrotvrdosti byla provedena na metalografických preparátech příčných řezů pomocí zařízení triboindenter TI950 od firmy Hysitron osazeným hrotem typu Berkovič. Záměrem analýzy bylo zjistit změnu tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od obrobeného povrchu. Maximální zatížení bylo nastaveno na 10 mN s ohledem na tvrdost zkoumaného materiálu. Před samotným měřením vzorků byla použita metoda „drift control“, která má za cíl stabilizovat zatěžující hrot v kontaktu se vzorkem. Pro analýzu byla využita standardní funkce s označením QS trapezoid, která se skládá z náběhové fáze, výdrže na definované normálové síle a následném postupném odlehčení, přičemž celý postup je znázorněn na obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Jednotlivé fáze zatěžování v průběhu měření mikrotvrlosti.

V rámci analýzy byl pomocí kamery zaměřen počáteční bod ve vzdálenosti 0,02 mm od povrchu vzorku s následným inkrementálním posunem 0,1 mm mezi indenty, přičemž celkem bylo na každém vzorku provedeno 10 indentů.



Obr. 5.4 Mikrotvrdost změřená v jednotlivých místech ve vzdálenosti od povrchu vzorku.

Výsledky měření v jednotlivých místech na vzorcích byly sestaveny do grafu, který je znázorněn na obrázku 5.4. Tvrdość ocelí je v zásadě daná hustotou dislokací a karbidickou fází (tato může pohyb dislokací, resp. jejich vytváření blokovat). Analýza mikrostruktury v kapitole 5.1 neprokázala zásadní rozdíly co do velikosti, počtu a distribuci karbidů v případě porovnání obou dokončovacích technologií – soustružení a broušení. Ani analýza mikrotvrdości nepřinesla rozdíly mezi jednotlivými technologiemi před a po tepelném zpracování, což je velmi dobře patrné z grafu 5.4.

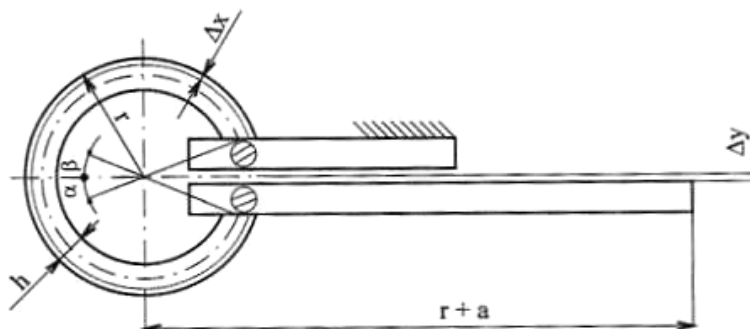
Reálnou intenzitu změn tvrdosti pravděpodobně není možné tímto měřením mikrotvrdości jednoznačně indikovat vzhledem k rozměrům použitého hrotu indentoru.

5.3 Vyhodnocení zbytkových napětí

Mechanické metody měření zbytkových napětí jsou založeny na měření deformace zkušebních těles. Nejvhodnější je zkoušet zbytkové napětí na kroužcích o průměru 30 až 100 mm. Po vyloučení vnějších vlivů na deformace se kroužek na jednom místě rozřeže a z jeho vnější válcové plochy se elektrolytickým leptáním postupně odebírá deformovaná vrstva. Přitom se neustále kontroluje deformace kroužku pomocí tisícinnového úchylkoměru a současně se kontroluje tloušťka odebrané vrstvy. Na základě závislosti deformace na velikosti vrstvy se vypočte průběh napětí prvního řádu. Další metody založené na mechanickém principu umožňují měřit dvoj- a trojosou napjatost, vyžadují však jiná zkušební tělíska, jsou složitější.

Rozřezaný kroužek je možné považovat za křivý prut, který pro zjednodušení výpočtu budeme pokládat za tenký. Prut je třmenem pevně upnutý k rámu. Deformace se měří na konci volného třmenu. Místo měření na třmenu je ve vzdálenosti $(r + a)$ od středu kroužku dle obr. 5.5. Vychýlení třmenu Δy je součtem deformací, a to deformace [88,89]:

- způsobené momentem zbytkového napětí v odebrané vrstvě - Δy_1 ,
- prodloužení - Δy_2 ,
- vlivem tahových napětí a pootočení třmenu - Δy_3 .



Obr. 5.5 Schéma měření zbytkových napětí mechanickou metodou [23], [24]:

Deformace od momentu vnitřních sil ve vrstvičce:

$$\Delta y_1 = \frac{1}{E \cdot J} \cdot \int_a^{2\pi-\beta} M \cdot x \cdot ds, \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

kde: E je modul pružnosti v tahu $[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$, J je moment setrvačnosti průřezu kroužku $[\text{mm}^4]$, M je vnitřní síla ve vrstvě $[\text{N}]$.

$$M = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \Delta x \cdot b \cdot h, \quad (\text{N}) \quad (5.2)$$

kde: σ je napětí po odleptání vrstvy [MPa], b a h jsou rozměry průřezu kroužku [mm], $x = r \cdot (l - \cos \varphi)$ [mm], φ je doplňkový úhel, $\varphi = \frac{\pi}{2} - \beta$.

$$\text{Pro } \alpha = \beta = 30^\circ = \frac{\pi}{6}$$

$$\Delta y_1 = \frac{(5 \cdot \pi + 3) \cdot M \cdot r^2}{3 \cdot E \cdot J}. \quad [\text{mm}] \quad (5.3)$$

Deformace vyvolaná prodloužením kroužku:

$$\Delta y_2 = l \cdot \frac{\sigma}{E} = \frac{10\pi}{6} \cdot \frac{\sigma \cdot \Delta x \cdot r}{h \cdot E}, \quad [\text{mm}] \quad (5.4)$$

kde: l je délka kroužku

$$l = r \cdot (2 \cdot \pi - \alpha - \beta) \quad [\text{mm}] \quad (5.5)$$

Pootočení měřicího třmenu:

$$\Delta y_3 = a \cdot d\varphi, \quad [\text{mm}] \quad (5.6)$$

$$\Delta \varphi = \frac{1}{E \cdot J} \cdot \int_a^{2\pi-\beta} M \cdot ds, \quad [\text{rad}] \quad (5.7)$$

$$\Delta y_3 = \frac{5 \cdot \pi}{3} \cdot a \cdot \frac{M \cdot r}{E \cdot J}, \quad [\text{mm}] \quad (5.8)$$

kde: a je rameno měřicího třmenu [mm].

Výsledná deformace:

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3. \quad [\text{mm}] \quad (5.9)$$

Po dosazení a úpravě:

$$\Delta y = \sigma \cdot \frac{b \cdot h \cdot r \cdot \Delta x}{6 \cdot E \cdot J} \cdot \left[(5 \cdot \pi + 3) \cdot r + 10,3 \cdot \pi \cdot \frac{J}{b \cdot h^2 \cdot r} + 5 \cdot \pi \cdot a \right]. \text{ [mm]} \quad (5.10)$$

Po dosazení a zesumarizování konstantních hodnot dostaneme vzorec pro hodnoty napětí v první vrstvě

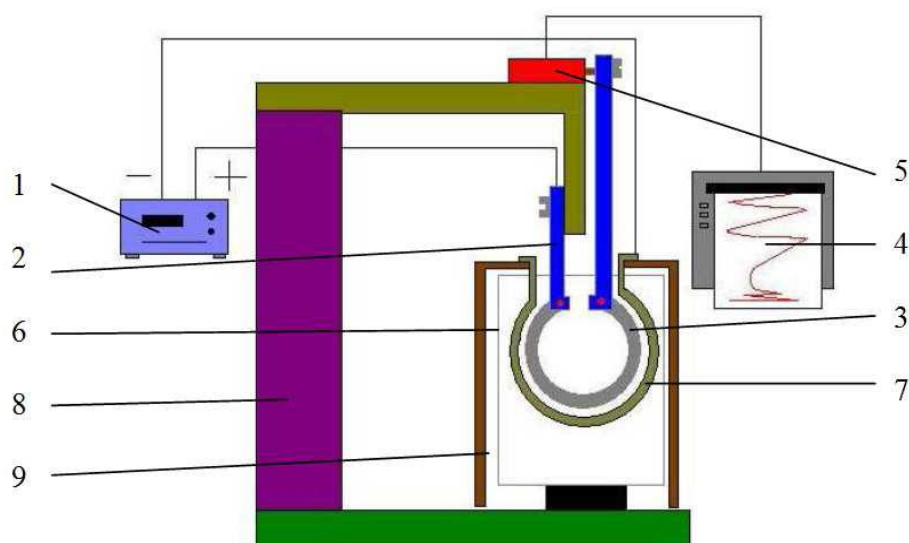
$$\sigma = \text{const} \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad \text{[MPa]} \quad (5.11)$$

kde: Δy je naměřená deformace [mm] a Δx je tloušťka odleptané vrstvy [mm].

Postup měření

Při měření zbytkových napětí mechanickou metodou na rotačních vzorcích je postup následující:

- z kroužku se vyřeže část o velikosti 10 až 15 mm podle průměru kroužku,
- na kroužku se změří jeho průměr, šířka a tloušťka stěny,
- kroužek se upne do třmenů a všechny plochy kromě té, která se bude měřit, se pokryjí voskem, aby se zabránilo jejich elektrolytickému leptání,
- leptaný povrch se očistí etanolem nebo technickým benzínem,
- prostřednictvím třmenů se kroužek upne na stojan a na obvod kroužku se přisune olověná katoda (upnutá na držáku, viz obr. 5.6), která má negativní tvar leptané plochy (mezera mezi kroužkem a katodou je přibližně 5 mm),
- katoda a anoda se připojí na zdroj proudu (- olověná katoda +vzorek jako anoda),
- nádoba (6) z obr. 5.6 se naplní elektrolytem,
- po napojení měřicího kontaktu na druhý třmen se zapne zdroj,
- během leptání se deformace kroužku (jeho otevírání resp. zavírání) registruje zapisovačem (4),
- proces na kroužcích průměru 140 mm trvá přibližně 4 hodiny v závislosti na tom, do jaké hloubky zasahují zbytková napětí,
- experiment se ukončí vypnutím proudového zdroje,
- vzorek se sejme, očistí a opětovně se změří tloušťka stěny kroužku,
- pokud jsou známy mechanické vlastnosti kroužku, je podle výše uvedeného matematického aparátu možné vypočítat velikost zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách.



Obr.5.6 Schéma měřicího zařízení 1 – zdroj elektrického proudu, 2 – upínací třmen, 3 – zkušební vzorek, 4 – zapisovač, 5 – indukční snímač, 6 – nádoba s elektrolytem, 7 – katoda, 8 – stojan, 9 – držák [90].

Podmínky leptání jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Tab. 5.2 Podmínky leptání

Typ zapisovače	TZ 4100
Elektrolyt	21% roztok H_2SO_4
Délka pomocného ramínka	135 mm
Elektrické napětí a proud při elektrolýze	5 V a 6A

Výpočet napětí

Při samotném výpočtu napětí v jednotlivých vrstvách se postupuje následovně:

- z naměřených hodnot se vypočítá tloušťka odleptané vrstvy (jako rozdíl v tloušťce stěny kroužku před a po leptání),
- pokud se realizuje analýza zbytkových napětí po vrstvách o tloušťce 0,01 mm, získaný záznam ze zapisovače se rozdělí na příslušný počet dílů (pokud je například odleptaná tloušťka 0,08 mm, rozdělí se záznam na 8 stejných dílů),
- někdy je potřebné rozdělit záznam jinak, a to především v případě, když se napětí prudce mění v tenkých vrstvách, jejichž tloušťka je menší než 0,01 mm; toto se realizuje především na samotném povrchu, kdy se povrchová vrstva tloušťky 0,01 mm rozdělí na menší části (takové opodstatnění je možné vidět hlavně tehdy, když se mění směr napětí z tahových na tlakové a naopak),

- v jednotlivých vrstvách se změří velikost deformace (skutečnou hodnotu deformace je možné určit po kalibraci),
- kalibrace se realizuje tak, že mezi měřicí dotyk a snímač se umístí těleso známé tloušťky – jeho odebráním z kontaktu dochází k posunutí pozice zapisovacího pera na zapisovači (velikost posunutí odpovídá tloušťce tělesa),
- v našem případě se měření realizovalo při nastaveném měřicím rozsahu na zapisovači 1 a 2 V (při rozsahu 1 V : 1 mm na papíře odpovídá skutečnému posunutí 1 μm , při rozsahu 2 V: 1 mm na papíře odpovídá skutečnému posunutí 2 μm),
- pokud jsou známy rozměry kroužku (průměr, šířka a tloušťka stěny), jeho mechanické vlastnosti (hlavně modul pružnosti v tahu E) a deformace v jednotlivých vrstvách, je možné zbytková napětí vypočítat, jak to ukazuje následující příklad (tabulka 5.3):

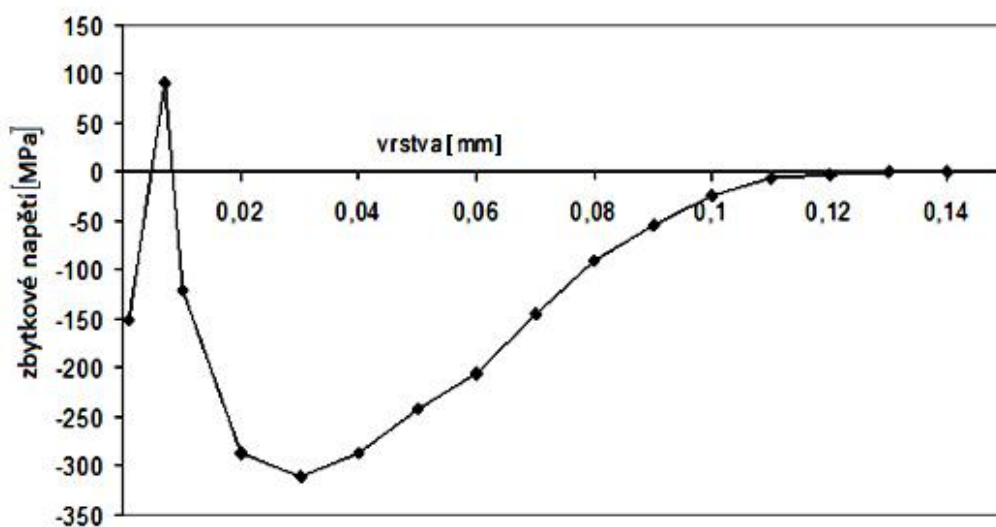
Příklad výpočtu:

Příklad výpočtu zbytkových napětí je realizován na kroužku válcovaném za studena po soustružení po TZ:

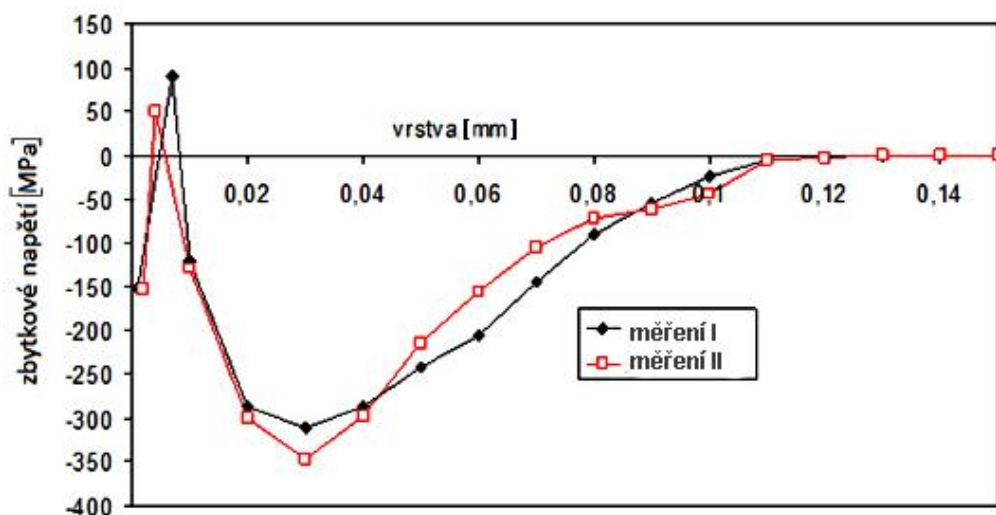
- rozměry kroužku před leptáním:
 - průměr kroužku: 140,60 mm,
 - šířka kroužku: 10,40 mm,
 - tloušťka před leptáním: 5,91 mm.
- odleptaná tloušťka: 0,15 mm,
- rameno třmenu: 135,00 mm,
- modul pružnosti: 210 000 MPa,
- moment setrvačnosti J: 178,90 mm⁴,
- konstanta pro výpočet: 0,066,
- měřicí rozsah na zapisovači: 2 V.

Tab. 5.3 Vzorový výpočet zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách

Odleptaná vrstva, Δx přírůstek [mm]	Vrstva [mm]	Konst. měření	Skut. def. Δy [μm]	Napětí [MPa]	Konst. def.	Def. na papíře [mm]
x1	0,001	0,066149	-10	-151,175	0,002	-5
x2	0,006	0,066149	6	90,70486	0,002	18
x3	0,003	0,066149	-8	-120,94	0,002	-12
x4	0,01	0,066149	-19	-287,232	0,002	-95
x5	0,01	0,066149	-20,6	-311,42	0,002	-103
x6	0,01	0,066149	-19	-287,232	0,002	-95
x7	0,01	0,066149	-16	-241,88	0,002	-80
x8	0,01	0,066149	-13,6	-205,598	0,002	-68
x9	0,01	0,066149	-9,6	-145,128	0,002	-48
x10	0,01	0,066149	-6	-90,7049	0,002	-30
x11	0,01	0,066149	-3,6	-54,4229	0,002	-18
x12	0,01	0,066149	-1,6	-24,188	0,002	-8
x13	0,01	0,066149	-0,4	-6,04699	0,002	-2
x14	0,01	0,066149	-0,2	-3,0235	0,002	-1
x15	0,01	0,066149	0	0	0,002	0
x16	0,01	0,066149	0	0	0,002	0
x17	0,01	0,066149	0	0	0,002	0

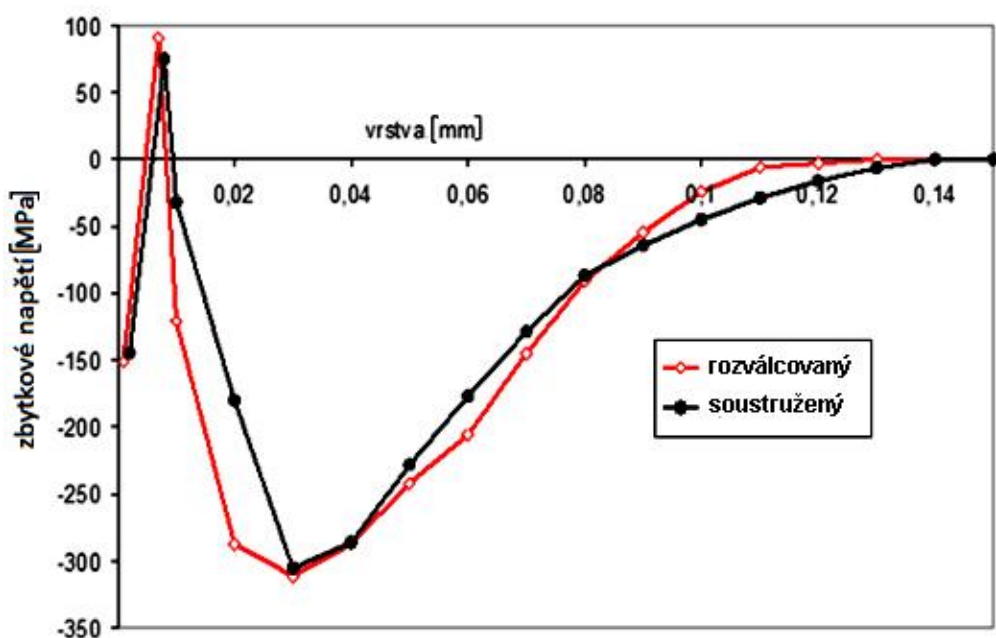


Obr. 5.7 Profil zbytkových napětí vzorku č. 4 s polotovarem rozválcovaným a soustruženým po TZ.



Obr. 5.8 Opakovaná měření zbytkových napětí vzorku č. 4 s polotovarem rozválcovaným a soustruženým po TZ.

Protože se v první vrstvě tloušťky 0,01 mm mění tlakové napětí na tahové a opět na tlakové, byla první vrstva rozdělena na 3 části. Výpočet napětí v jednotlivých vrstvách ukazuje tab. 5.3 a zobrazuje obr. 5.7. Každé měření bylo opakované minimálně 2 krát. Opakovaná měření 2 kroužků po válcování za studena a soustružení po TZ ukazuje obr. 5.8. Porovnání profilů zbytkových napětí po soustružení po TZ ukazuje obr. 5.9. Porovnání profilů zbytkových napětí po kalení je zobrazeno na obr. 5.10.



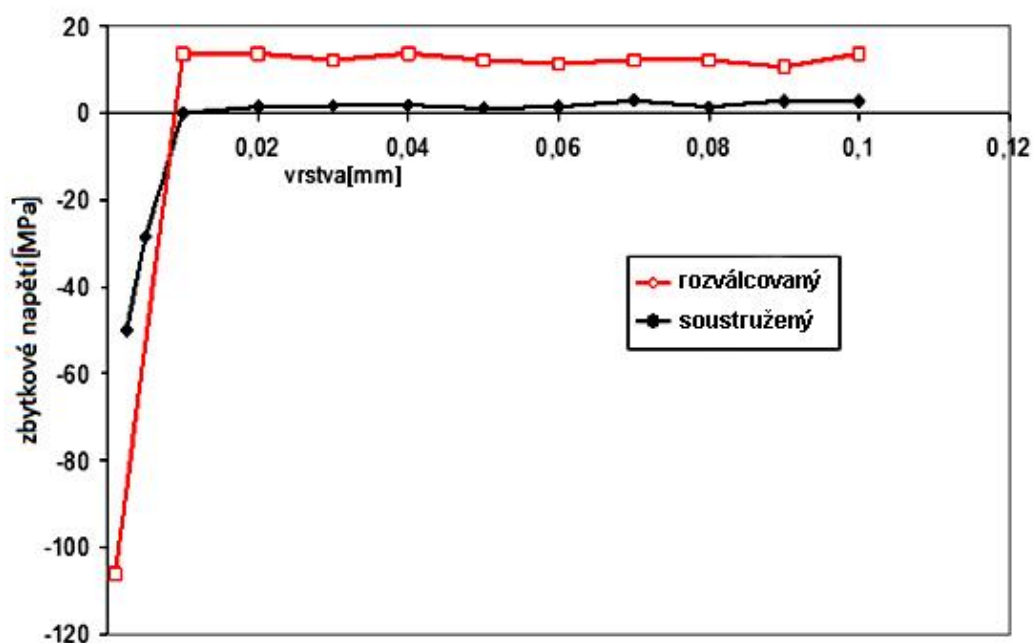
Obr. 5.9 Porovnání profilů zbytkových napětí vzorků č. 2 (polotovár soustružený) a 4 (polotovár rozválcovaný), které byly soustruženy po TZ.

Z hlediska zbytkových napětí je možné vidět výrazný rozdíl v napěťovém stavu (profilu) mezi oběma analyzovanými strategiemi jen před tepelným zpracováním. Proces soustružení vytváří profil zbytkových napětí, který odpovídá teoretickým poznatkům o vlivu geometrie nástroje (především zaoblení řezné hrany a jejího opotřebení) - vliv toho, že řezná hrana má jistý poloměr zaoblení zrn, kdy jistá část odebírané vrstvy nepřechází do třísky, ale podtéká pod řeznou hranu, kde je vystavená deformaci (plastické + elastické). V souvislosti s tím, se bezprostředně na povrchu nachází tenká vrstva obsahující tlaková napětí, které poměrně rychle přecházejí do tahových. Směr napětí při obrábění je daný třemi základními aspekty, jako jsou:

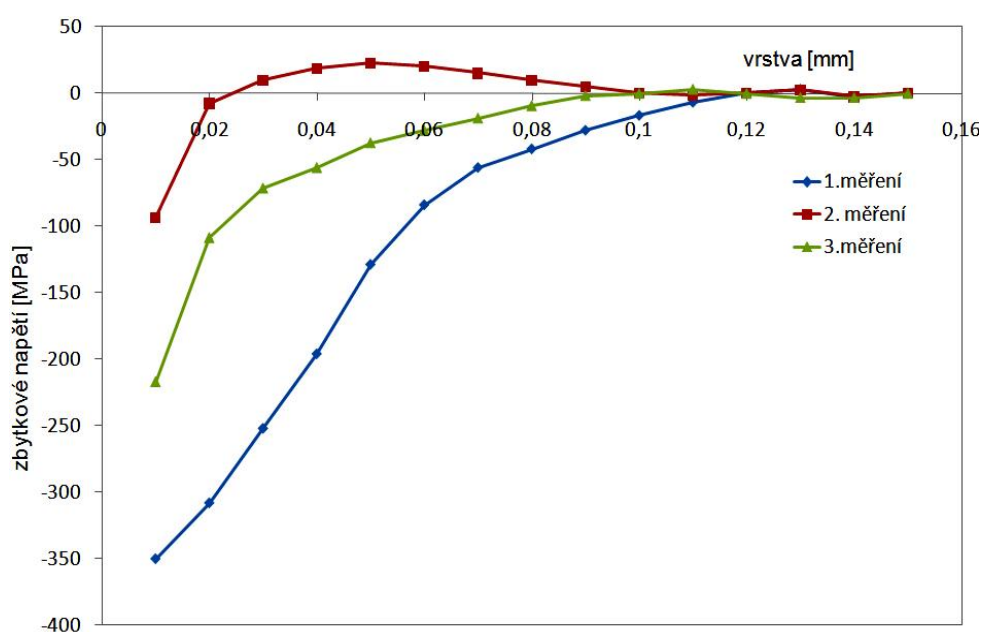
- mechanické zatížení (plastické přetvoření) vytvářející příznivá tlaková napětí,
- tepelné zatížení vytvářející příznivá tahová napětí,
- změna struktury (oba směry napětí).

Vznik zbytkových napětí, je potom daný tím, že intenzita ať už mechanického anebo tepelného zatížení není stejná ve všech vrstvách pod povrchem. Tento gradient se vyrovnává vznikem zbytkových napětí, která zůstávají v povrchu, i když už vnější zatížení nepůsobí. Při obrábění je materiál obrobku vystavený kombinovanému mechanickému a také tepelnému zatížení (někdy i v kombinaci se strukturními změnami). Výsledný stav napětí (tah anebo tlak) je daný tím, který z těchto efektů dominuje, přičemž v různých vrstvách pod povrchem se může dominance primárního vlivu měnit. Proto v tenké vrstvě pod povrchem dominují tlaková napětí, neboť je zde dominantní mechanický účinek v souvislosti s podtékáním materiálu pod řeznou hranu, přičemž v hlubších vrstvách pod povrchem je to tepelný účinek. Tahová napětí se vyskytují ve vrstvě do hloubky 0,07 mm a přecházejí opět do tlakových o velikosti 35 MPa. Tlaková napětí v hlubších vrstvách nejsou vytvořena účinkem procesu soustružení při obrábění kroužku, ale jsou indikována předcházejícím procesem tváření polotovaru za tepla u subdodavatele.

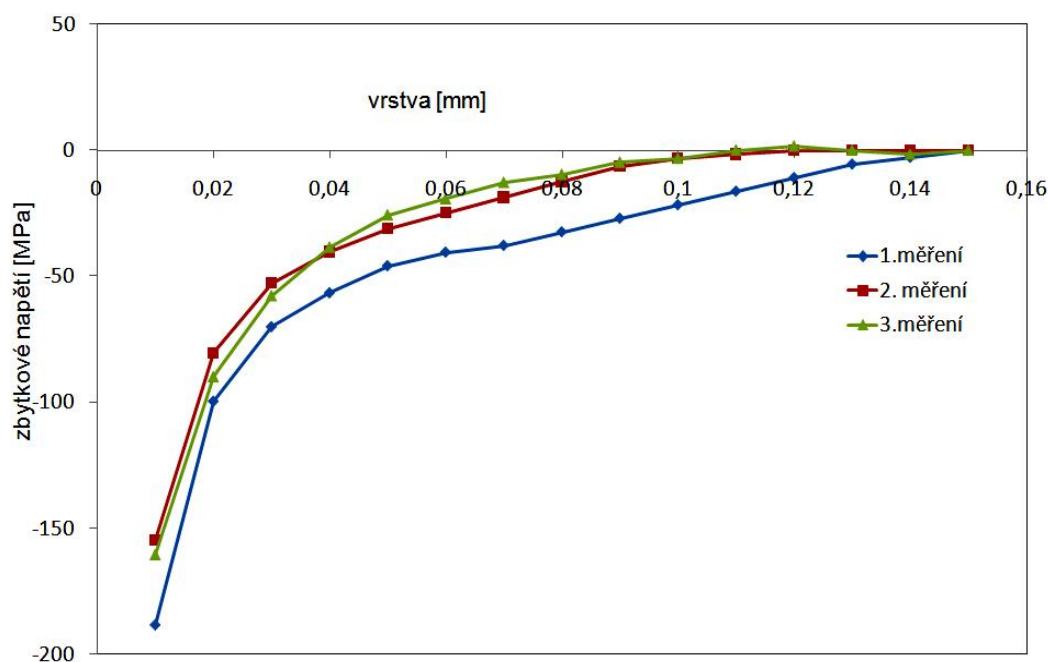
Profil zbytkových napětí po rozválcování za studena je v mnohém podobný tomu, který vzniká soustružením. V povrchové vrstvě se nacházejí tlaková napětí. Tato tlaková napětí se vyskytují v stagnační oblasti viditelné na metalografii. V hlubších vrstvách pod povrchem jsou na metalografii dobře viditelná preferenční usměrnění feritické matrice ve směru válcování, ale na povrchu v kontaktu obrobku s tvářecím nástrojem je přetvoření matrice odlišné v souvislosti s třením mezi obrobkem a nástrojem – stagnační oblast. Proto se v této oblasti vyskytují tlaková napětí a v hlubších vrstvách pod povrchem (tam, kde je viditelné zjevné preferenční usměrnění matrice) jsou to především tahová napětí, jejichž velikost se stabilizuje na 100 MPa. Profily zbytkových napětí před TZ ukazují, že po soustružení je gradient napětí sice větší (větší tlaková, ale i tahová napětí), ale v hlubších vrstvách pod povrchem dominuje efekt odlišného režimu válcování za studena (generujícího tahová napětí magnitudy 100 MPa) a za tepla (generujícího tlaková napětí velikosti 35 MPa).



Obr. 5.10 Porovnání profilů zbytkových napětí po kalení vzorků č. 5 (polotovár rozválcovaný) a 6 (polotovár soustružený).



Obr. 5.11 Profily zbytkových napětí vzorků č. 1 s polotovarem soustruženým a broušený před TZ.



Obr. 5.12 Profily zbytkových napětí vzorku č. 3 s polotovarem rozválcovaným a broušený před TZ.

Proces kalení a následného popouštění výrazně eliminuje rozdíly mezi oběma strategiemi a také velikost samotných napětí. Při ohřevu na austenitizační teplotu a také během výdrže na této teplotě, zbytková napětí na povrchu a také v průřezu postupně relaxují a nově vytvořený stav zbytkových napětí je daný režimem tepelného zpracování. Zbytková napětí se vytvářejí především při prudkém ochlazení do kalicího oleje, avšak jejich velikost je výrazně redukována následovným popouštěním. Pokud je režim kalení a také popouštění pro obě strategie stejný, je také stav zbytkových napětí po kalení a popouštění velmi podobný a velikost tahových zbytkových napětí nízká.

Výraznější rozdíl v profilu napětí mezi jednotlivými strategiemi není zjevný ani po soustružení po TZ. Pro soustružení kalených materiálů jsou charakteristické výrazné elastické deformace s ohledem na vysokou tvrdost a omezenou plasticitu takového materiálu a také na vysoké mechanické zatížení povrchu při zvýšených teplotách v souvislosti s vysokou hodnotou pasivní složky řezné síly. Profil zbytkových napětí je proto výrazně odlišný od profilu, který vzniká soustružením ocelí ve stavu žíhaném. Profil zbytkových napětí obvykle dominují výrazná tlaková napětí. Na povrchu se můžou nacházet jak tahová, tak také tlaková napětí (v závislosti na řezných podmínkách, opotřebení nástroje a jeho geometrie). S rostoucí hloubkou pod povrchem do určité hloubky velikost tlakových napětí roste, v určité hloubce dosahuje maximum, potom klesá asymptoticky k nule. Pokud však na povrchu vznikne bílá vrstva, tak se do profilu zbytkových napětí kromě gradientu teploty a deformace promítá také změna struktury. Tenká bílá vrstva na povrchu je potom zodpovědná za tlaková napětí na samotném povrchu, avšak pod bílou sekundárně zakalenou vrstvou se nachází tepelně

popuštěná oblast obsahující tahová napětí, která opět poměrně rychle přecházejí do tlakových napětí v hlubších vrstvách. Odlišná historie kroužků před TZ tedy nemá vliv na profil zbytkových napětí po soustružení po TZ. Rozhodujícími faktory jsou řezné podmínky (především řezná rychlost, opotřebení nástroje a jeho geometrie). Profily zbytkových napětí po soustružení po TZ pro obě strategie před TZ jsou v podstatě stejné i vzhledem k tomu, že strukturní i napěťový stav po samotném TZ je v podstatě velmi podobný, téměř nezávislý na použité strategii, stavu zbytkových napětí a také mikrostruktury, který každá strategie vytváří.

V případě broušení, tak jak už bylo uvedeno, profily zbytkových napětí indikují poměrně nízké tepelné zatížení broušeného povrchu (pro obě strategie) a ukazují to, že řezné podmínky (a také další podmínky broušení) jsou zvoleny správně (obr. 5.11 a obr. 5.12). Důležitým aspektem vyplývajícím z opakovaných měření je skutečnost, že profily zbytkových napětí po broušení kroužků připravených před TZ strategií rozválcování vykazují mnohem menší rozdíl mezi opakovanými měřeními v porovnání s kroužky připravenými strategií soustružení. Jak již bylo uvedeno, tento aspekt je velmi důležitý z hlediska funkčnosti součástek vzhledem k tomu, že superfinišování (pokud by se následně realizovalo) už výrazněji napěťový stav nezmění (otázkou zůstává do jaké míry se do toho promítá samotná výroba polotovaru pro soustružení, jako externí faktor související s dodavatelem materiálu anebo tepelné zpracování – kalení, uložení kroužků v peci, jejich vzájemná poloha a podobně). Při rozválcování je homogenita produkce monitorovatelná a ovlivnitelná během samotné výroby. Vytvoření stagnační zóny po rozválcování se do finální kvality povrchu nijak nepromítá vzhledem k tomu, že tato vrstva se po TZ odstraní buď soustružením anebo broušením. Rozhodující je stav vrstev hlouběji pod povrchem. Stejně tak proces soustružení před TZ jako takový výraznější vliv na kvalitu, a s ní související funkčnost, nemá. Vrstva vytvořená podtékáním materiálu obrobku pod řeznou hranu se stejně tak odstraní v následujících operacích. Příčiny rozdílů tak, jak je ukazují obr. 5.11 a obr. 5.12 je potřebné hledat v rozdílech jednak charakteru martenzitu, ale především v jeho homogenitě, ať už v rámci jednoho kroužku, ale hlavně v rámci dané výrobní série. Pokud rozválcování určitým způsobem zhomogenizuje výrobní dávku, rozdíly na kroužcích po soustružení je potřeba hledat pravděpodobně buď:

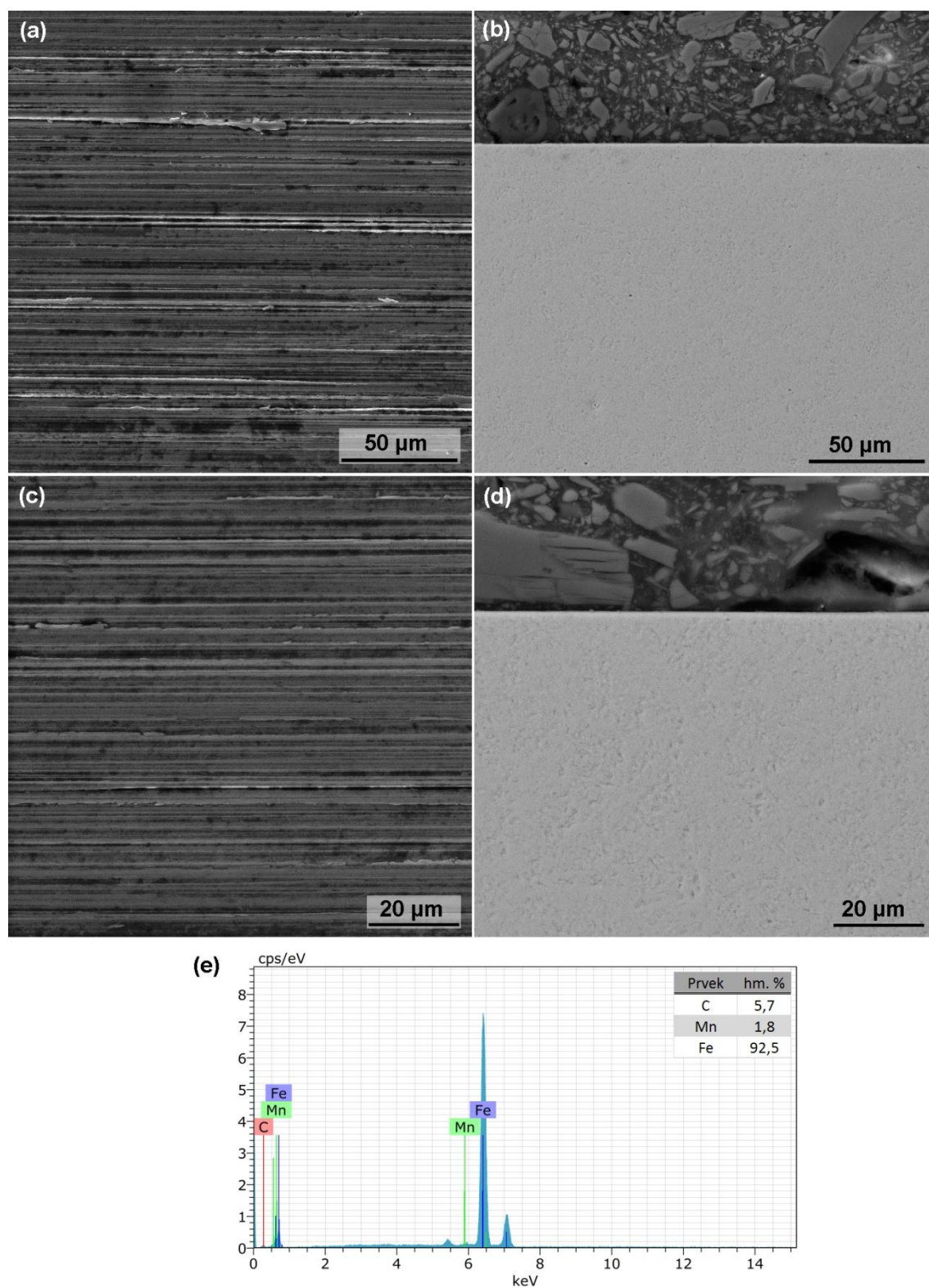
- už na straně dodavatele polotovaru, kde vyplývají z nehomogenity struktury v rámci dodávaného materiálu (rozdíly mezi tyčemi, resp. v rámci tyče, její střed x konec, apod.),
- už zmiňované tepelné zpracování (to je sice společné pro rozválcované i soustružené kusy, ale na druhé straně rozválcované kroužky mohou být méně citlivé na oscilaci podmínek kalení v porovnání se soustruženými kroužky).

5.4 Analýza morfologie povrchu a podpovrchové vrstvy pomocí SEM

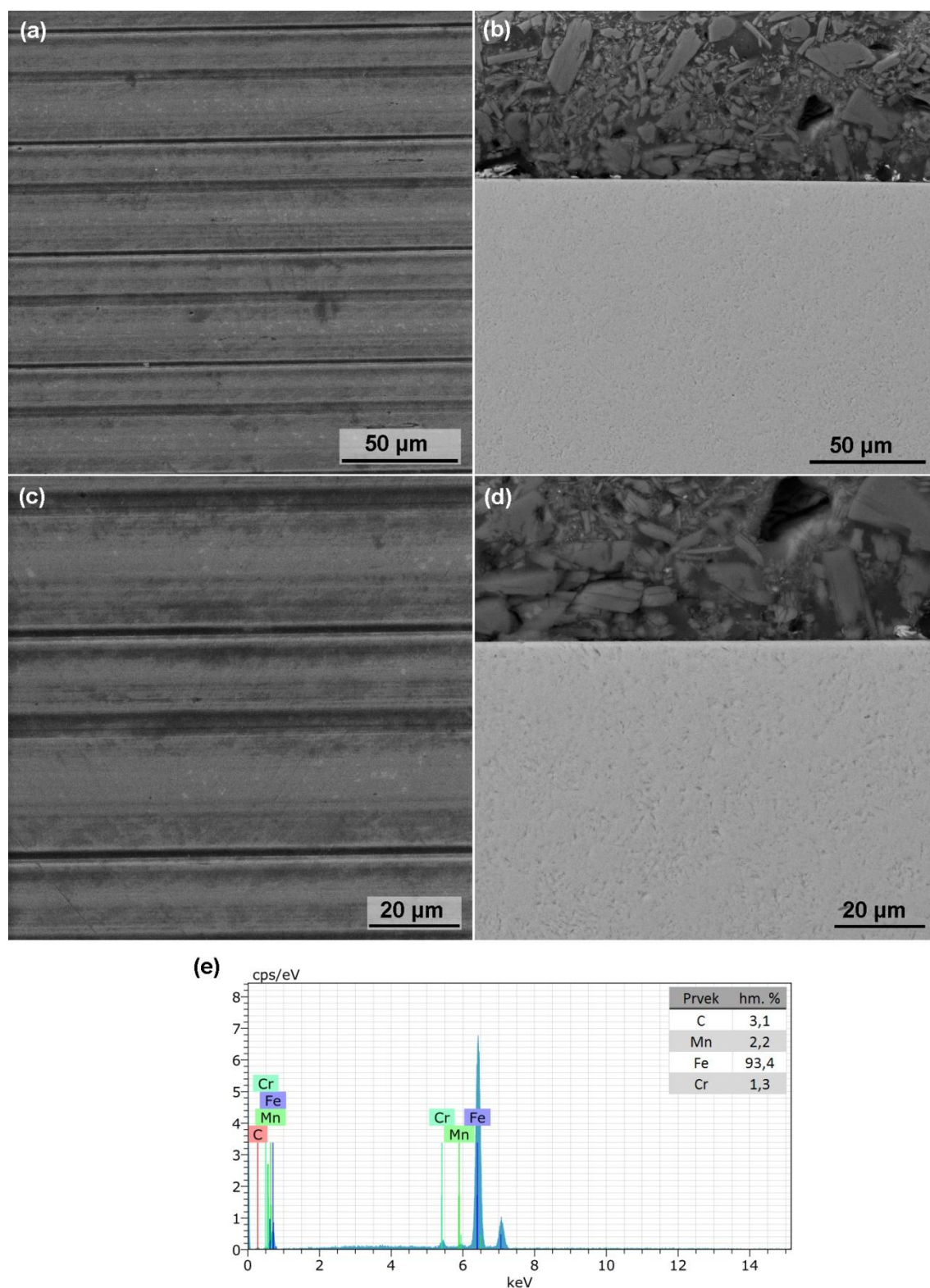
Studium morfologie povrchu a podpovrchové vrstvy všech obrobených vzorků bylo provedeno pomocí elektronové mikroskopie. Pro zobrazení byl ve všech případech využit detektor sekundárních elektronů (SE), přičemž vzorky byly vždy studovány při zvětšení 1000x a následně 2000x. Dále byla provedena analýza chemického složení pomocí energiově-disperzního detektoru rentgenového záření (EDX), jímž byl mikroskop vybaven.

Morfologie jednotlivých vzorků, která je znázorněna na obrázcích 5.13 až 5.18 byla velice odlišná. Je zřejmý rozdíl mezi jednotlivými dokončovacími technologiemi po TZ (broušení a soustružení) a také v technologiích použitých před tepelným zpracováním (soustružení a rozválcování). Porovnáme-li broušené vzorky po TZ (vzorek č. 1 a 3) jeví se morfologie vzorku s rozválcovaným polotovarem hladší bez výrazných stop po odebírání materiálu jednotlivými zrný brousicího kotouče. Porovnáme-li soustružené vzorky po TZ (vzorek č. 2 a 4), jeví se morfologie vzorku s rozválcovaným polotovarem zobrazená na obr. 5.16, opět výrazně spojitější a nejsou na ní patrné téměř žádné stopy po nástroji. Diametrálně odlišnou morfologii mají vzorky č. 5 a 6, které po tepelném zpracování nebyly žádným způsobem obrobeny, nicméně se mezi sebou také výrazně liší. Povrch pouze rozválcovaného vzorku je tvořen jednolitou vrstvou bez jakýchkoliv stop po nástroji, zatímco pouze soustružený povrch je tvořen povrchově rozpraskanou vrstvou materiálu, která se viditelně vydroluje. Stopy po předchozím soustružení jsou na povrchu stále zřetelné.

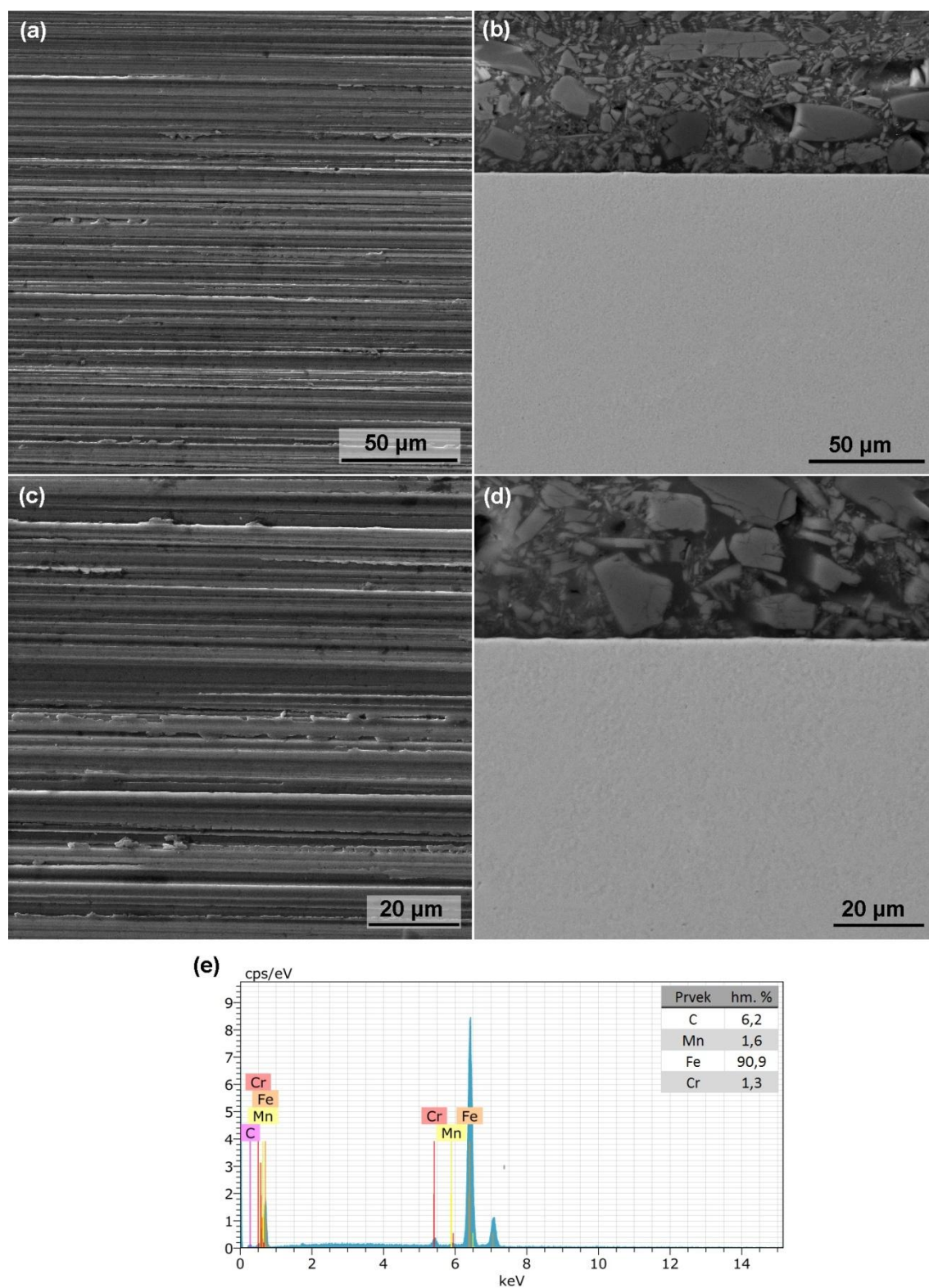
Podpovrchové vrstvy, které byly zkoumány v příčném řezu, nevykazují žádnou známku defektů v podobě trhlin nebo jiných a jsou zcela homogenní. Analýza chemického složení EDX provedená na všech vzorcích nevykazuje přítomnost žádného nástrojového materiálu. Pouze u vzorků č. 5 a 6 bez technologické operace po TZ došlo k výrazné kontaminaci kyslíkem (viz obr. 5.17) a uhlíkem (viz obr. 5.18).



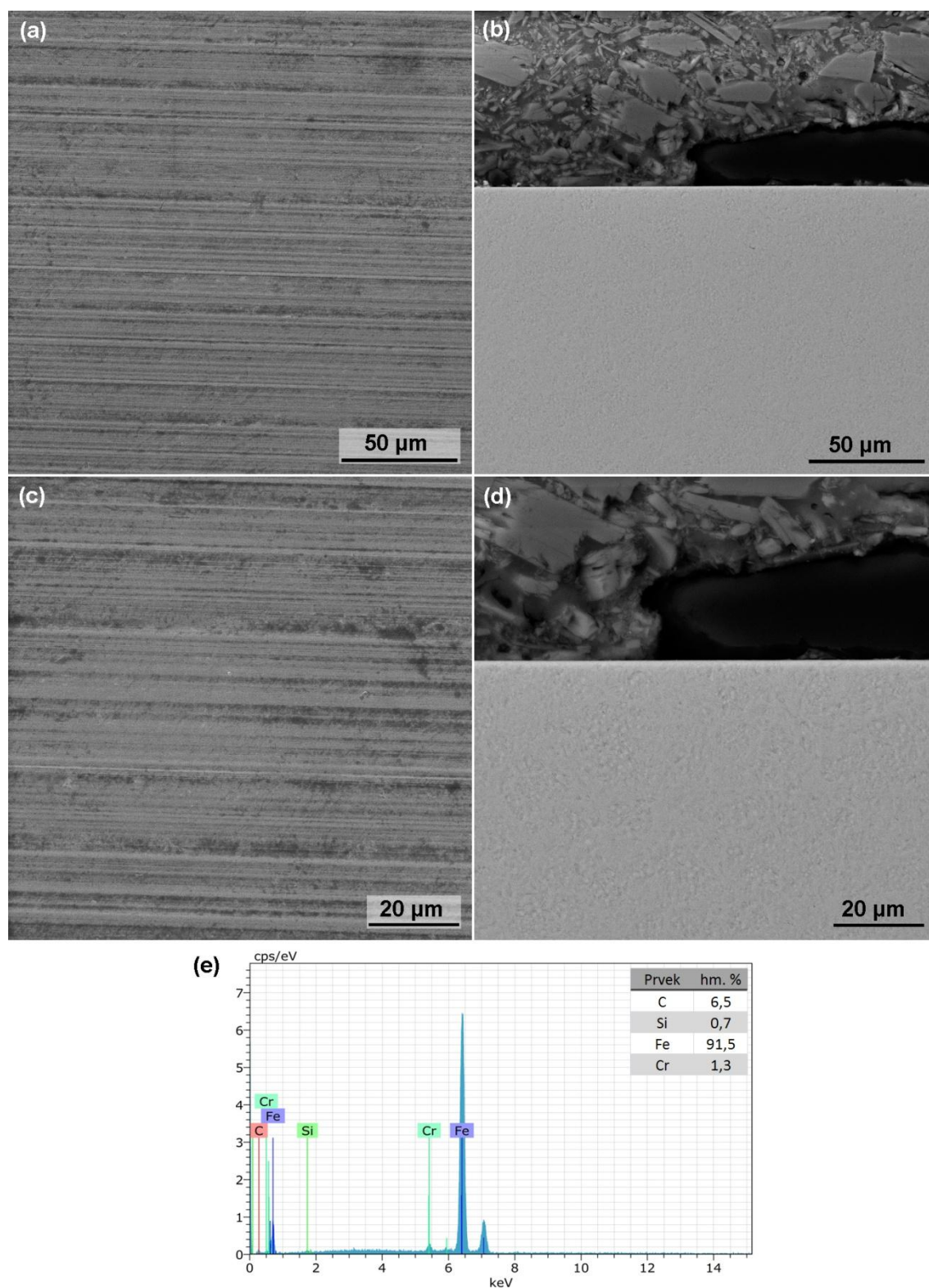
Obr. 5.13 Morfologie povrchu a podpovrchová vrstva včetně EDX pro vzorek č. 1 s polotovarem soustruženým a broušený po TZ (a,c) morfologie povrchu při zvětšení 1000x a 2000x, (b,d) příčný řez vzorkem při zvětšení 1000x a 2000x, (e) analýza EDX povrchu zobrazeného za c.



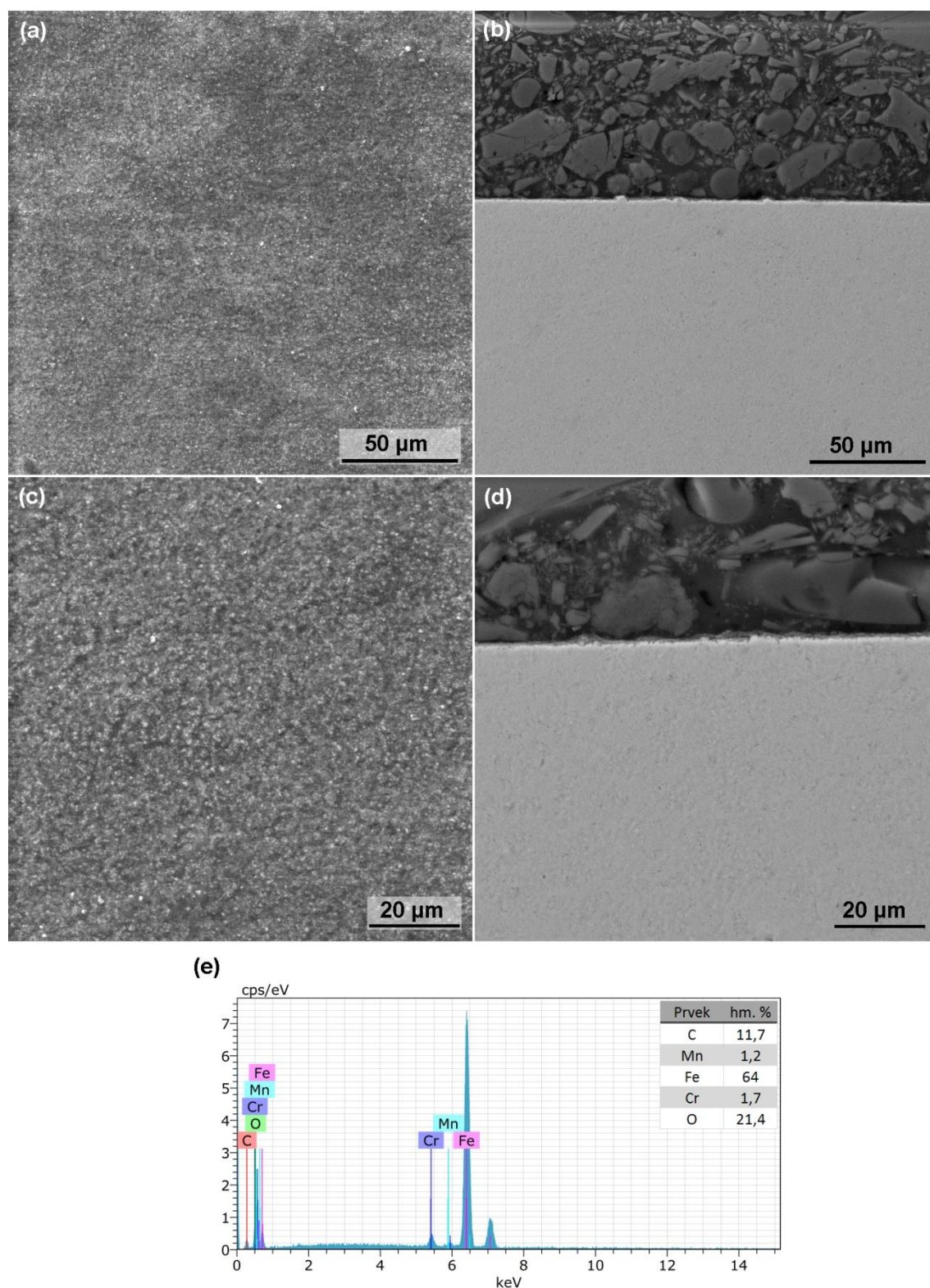
Obr. 5.14 Morfologie povrchu a podpovrchová vrstva včetně EDX pro vzorek č. 2 s polotovarem soustruženým a soustružený po TZ (a,c) morfologie povrchu při zvětšení 1000x a 2000x, (b,d) příčný řez vzorkem při zvětšení 1000x a 2000x, (e) analýza EDX povrchu zobrazeného za c.



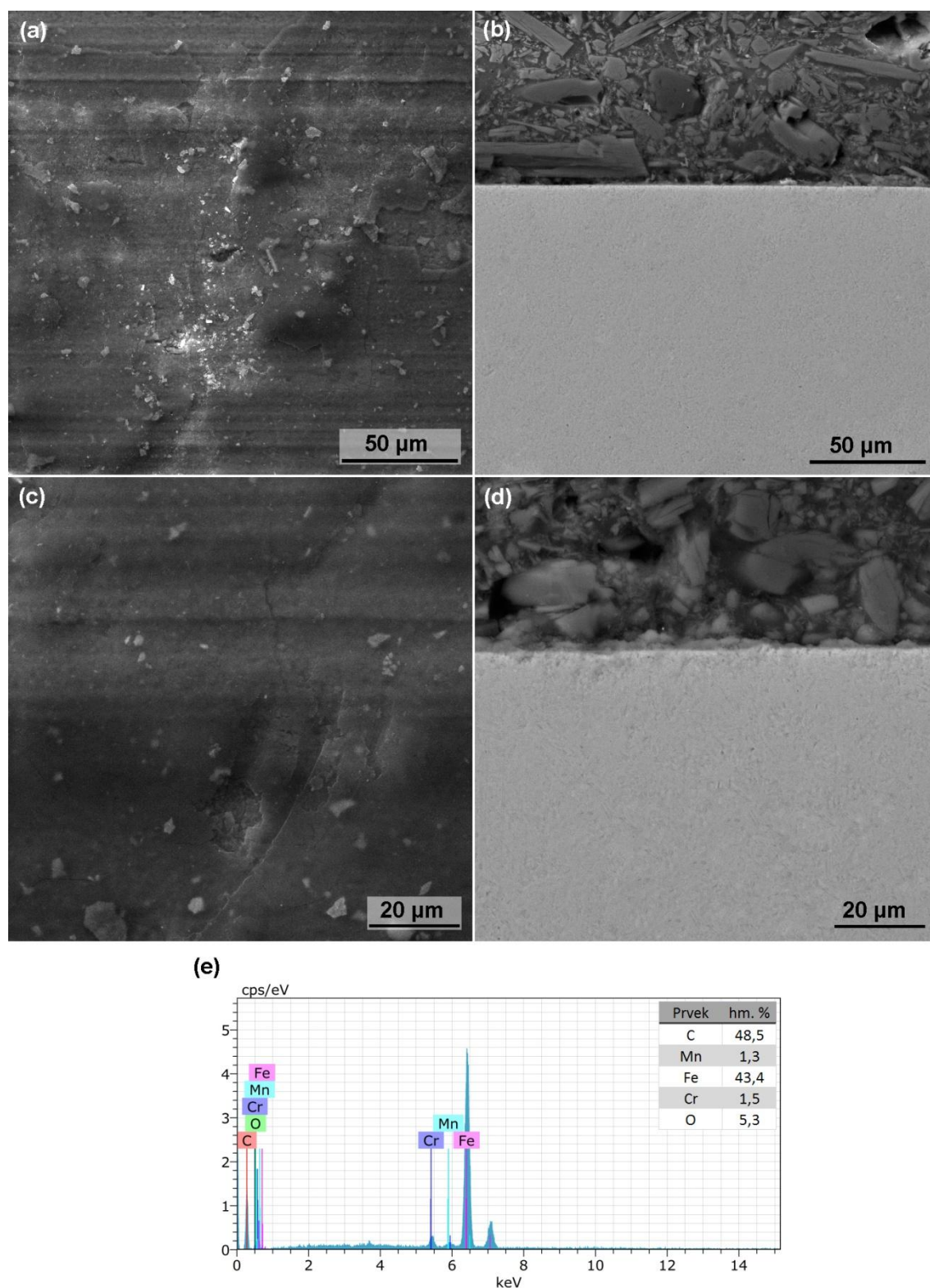
Obr. 5.15 Morfologie povrchu a podpovrchová vrstva včetně EDX pro vzorek č. 3 s polotovarem rozválcovaným a broušený po TZ (a,c) morfologie povrchu při zvětšení 1000x a 2000x, (b,d) příčný řez vzorkem při zvětšení 1000x a 2000x, (e) analýza EDX povrchu zobrazeného za c.



Obr. 5.16 Morfologie povrchu a podpovrchová vrstva včetně EDX pro vzorek č. 4 s polotovarem rozválcovaným a soustružený po TZ (a,c) morfologie povrchu při zvětšení 1000x a 2000x, (b,d) příčný řez vzorkem při zvětšení 1000x a 2000x, (e) analýza EDX povrchu zobrazeného za c.



Obr. 5.17 Morfologie povrchu a podpovrchová vrstva včetně EDX pro vzorek č. 5 s polotovarem rozválcovaným před TZ (a,c) morfologie povrchu při zvětšení 1000x a 2000x, (b,d) příčný řez vzorkem při zvětšení 1000x a 2000x, (e) analýza EDX povrchu zobrazeného za c.



Obr. 5.18 Morfologie povrchu a podpovrchová vrstva včetně EDX pro vzorek č. 6 s polotovarem soustruženým před TZ (a,c) morfologie povrchu při zvětšení 1000x a 2000x, (b,d) příčný řez vzorkem při zvětšení 1000x a 2000x, (e) analýza EDX povrchu zobrazeného za c.

5.5 Analýza topografie povrchu

Topografie obrobeného povrchu je velmi pečlivě zkoumána a posuzována, protože na ní závisí požadovaná funkčnost vyrobené součásti. Pro komplexní posouzení topografie je nezbytné vyhodnocovat více parametrů nežli pouze ten nejpoužívanější, kterým je průměrná aritmetická úchylka povrchu R_a . Z toho důvodu byly v tomto experimentu vyhodnocovány 2 parametry objemu nevyplněného materiálem a 2 parametry objemu materiálu, 3 parametry základního profilu, 3 profilové parametry a 3 jejich plošné ekvivalenty, které zajišťují kvantitativní hodnocení plochy všemi technicky významnými směry. Parametry objemu nevyplněného materiálem byly materiál nevyplněný objemem údolí na povrchu s omezenou stupnicí (V_{vv}) a materiálem nevyplněný objem jádra na povrchu s omezenou stupnicí (V_{vc}). Parametry objemu materiálu byly objem vrcholů materiálu na povrchu s omezenou stupnicí (V_{mp}) a objem jádra materiálu na povrchu s omezenou stupnicí (V_{mc}). Vyhodnocované parametry základního profilu byly průměrná aritmetická úchylka základního profilu (P_a), největší výška základního profilu (P_z) a průměrná kvadratická úchylka základního profilu (P_q). Parametry vyhodnocované profilovou metodou byly průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti (R_a), největší výška profilu drsnosti (R_z) a průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti (R_q). Plošnou metodou byly vyhodnoceny parametry aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu (S_a), maximální výška omezené stupnice povrchu (S_z) a základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu (S_q). Topografie povrchu byla studována pomocí bezdotykového 3D profilometru Taylor Hobson Talysurf CCI Lite dle odpovídající normy plošné parametry ISO 25178-2, profilové a parametry základního profilu ISO 4287. Naměřená data byla následně zpracovávána v softwaru TalyMap Gold, který umožňoval vytvoření 2D a 3D modelu analyzovaného povrchu.

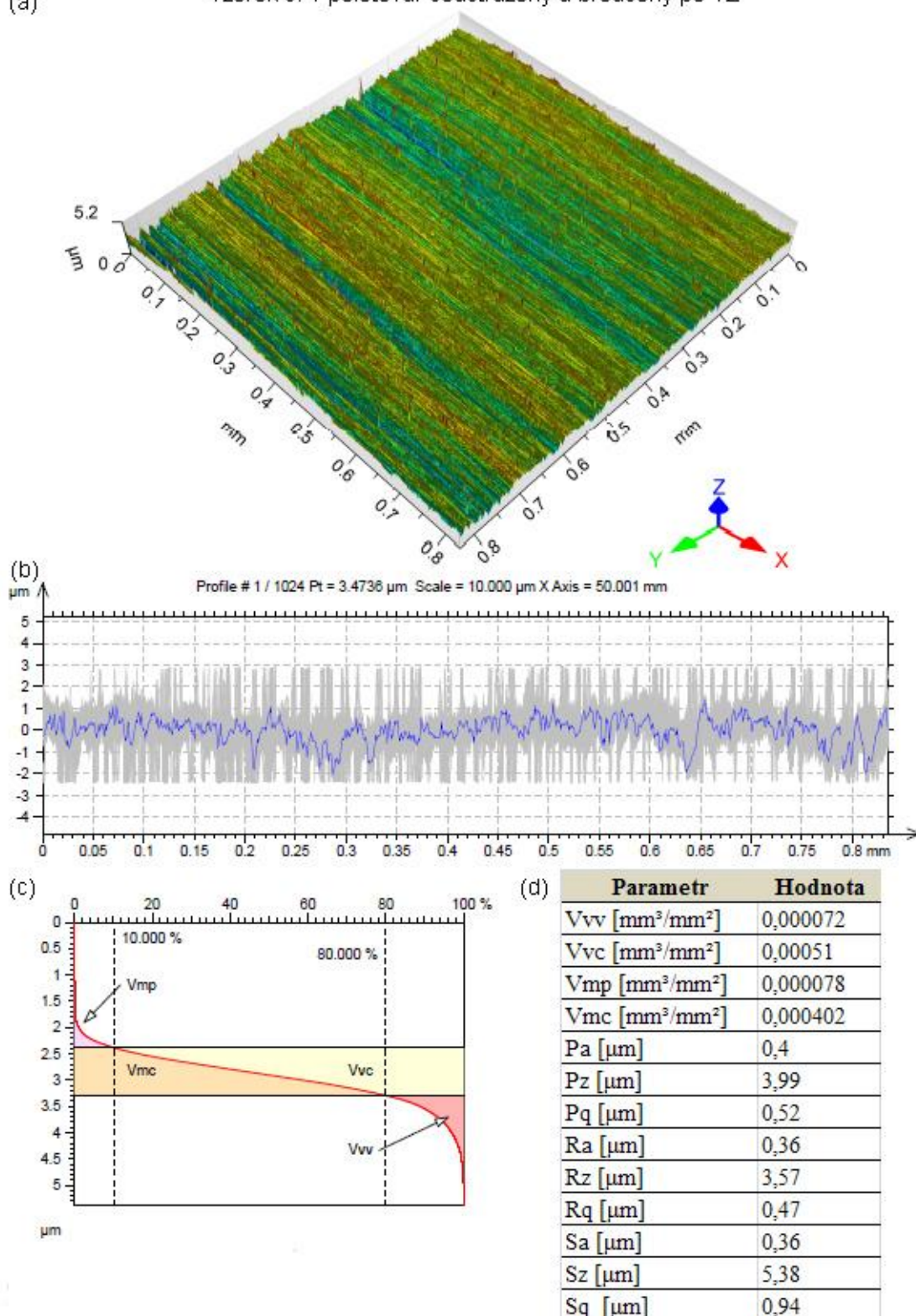
Všechny parametry byly vyhodnoceny na 1024 profilech jediné vyhodnocovací délky $l_r = 0,8$ mm získané z povrchu po aplikaci S-filtru a F-operace (S-F) měření provedených s objektem 20x. Pro měření bylo zvoleno 5 náhodných míst na každém vzorku a následně vytvořen průměr těchto hodnot.

Analýza topografie povrchu byla realizována na površích (po operacích), které potenciálně mohou být finálními povrchy, tedy poslední operací vytvářející povrch, který bude vystaven reálnému zatížení v praxi. Jedná se tedy o povrchy po soustružení po TZ a broušení. Tato kapitola, kromě porovnání strategií soustružení a rozválcování před TZ, prezentuje také porovnání soustružení po TZ a broušení. Porovnání soustružení po TZ a broušení je určitým způsobem problematické vzhledem k tomu, že obě operace mohou být ovlivněny velkým počtem proměnných, které následně ovlivňují nejen topografii povrchu. V této studii je však porovnání realizováno na povrchu za podmínek, jaké jsou obvykle používány v podmínkách výrobců valivých ložisek.

Na obrázcích 5.19 až 5.24 jsou znázorněny vyhodnocené parametry topografie jednotlivých povrchů vzorků včetně jejich 3D barevně filtrovaného reliéfu a křivky nosného podílu pro objemové parametry. Tato křivka pro objemové parametry a ne ty

profilové byla zvolena z důvodu vyšší vhodnosti posuzování povrchu ložiskových kroužků. Křivka popisuje vhodnost topografie povrchu k ulpívání maziv a také množství výstupků, které budou v průběhu styku s jiným dílem rychle odstraněny - opotřebení povrchu (znázorněno na obrázku 5.25). Právě množství maziva, které na povrchu kroužku může ulpět, je velmi důležitý parametr pro jeho posuzování. Z níže uvedených obrázků je jasné viditelný rozdíl mezi vzorky kroužků, které byly soustruženy po TZ a broušeny. Nejlépe budou ulpívat maziva na površích, které byly soustruženy po tepelném zpracování, tedy vzorky č. 2 a 4.

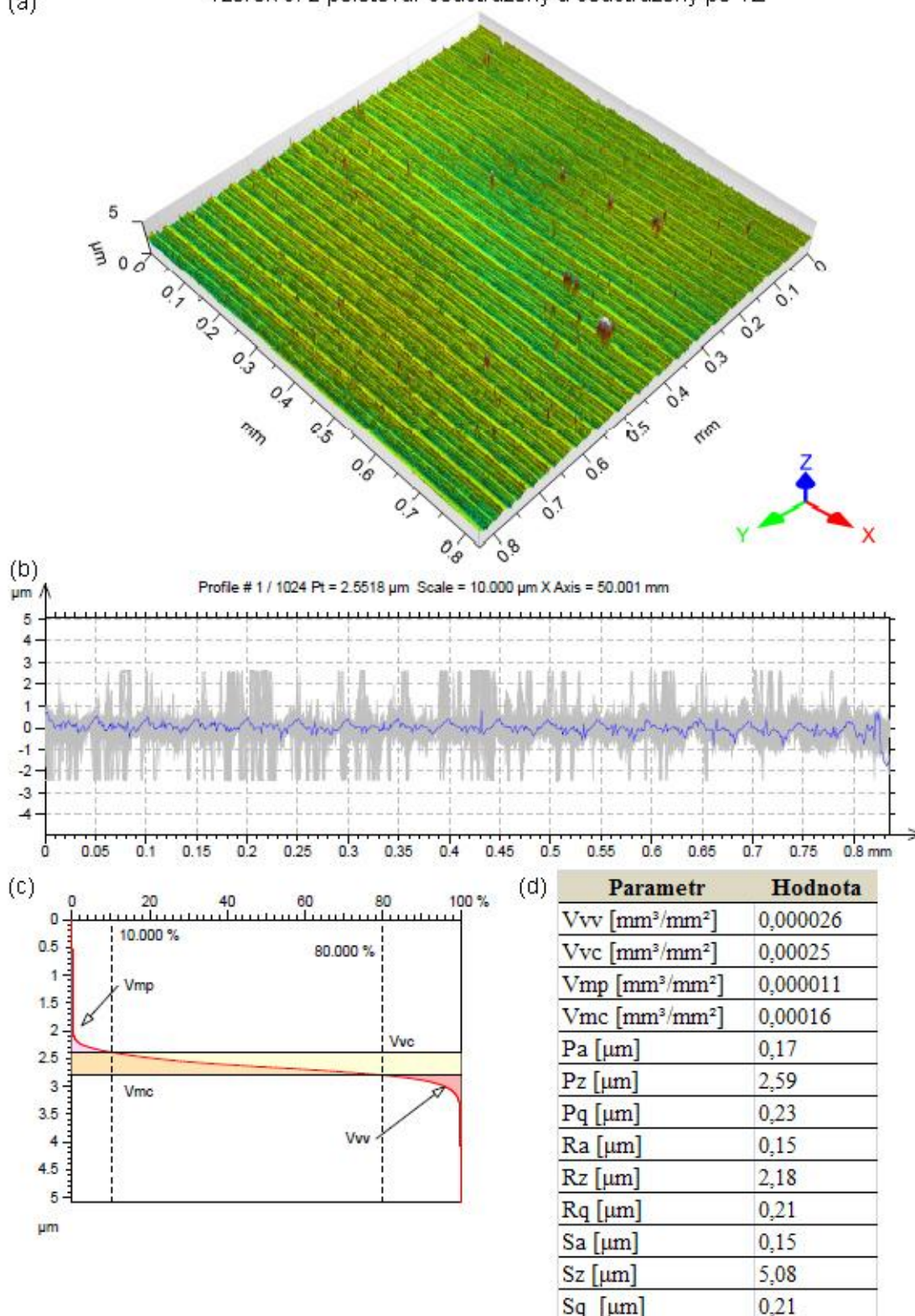
(a) Vzorek č. 1 polotovár soustružený a broušený po TZ



Obr. 5.19 Topografie povrchu a její vyhodnocení pro vzorek č. 1 s polotovarem soustruženým a broušeným po TZ (a) 3D reliéf povrchu, (b) křivky jednotlivých profilů v řezu, (c) křivka nosného podílu pro parametry objemu, (d) vyhodnocené parametry topografie povrchu.

(a)

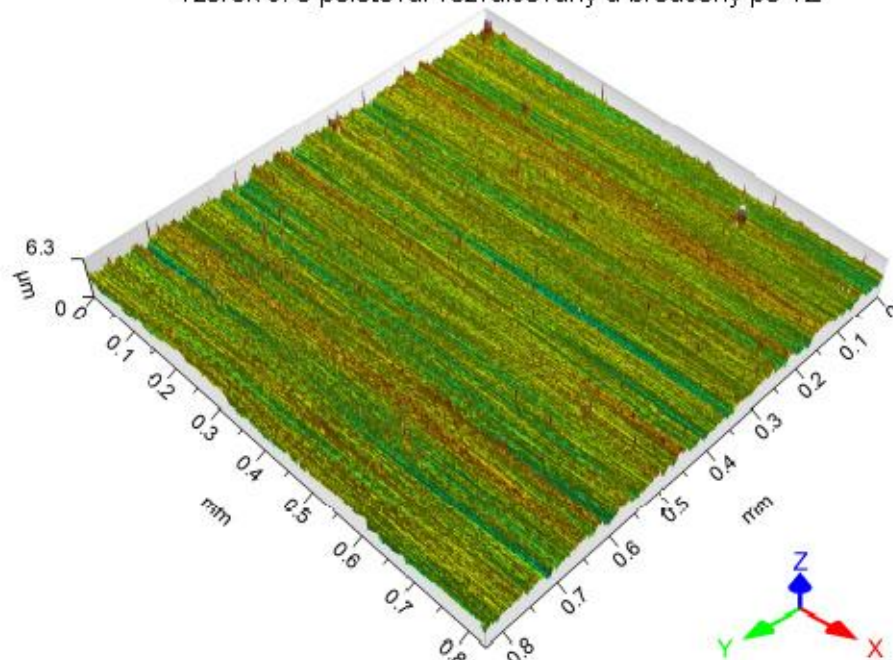
Vzorek č. 2 polotovar soustružený a soustružený po TZ



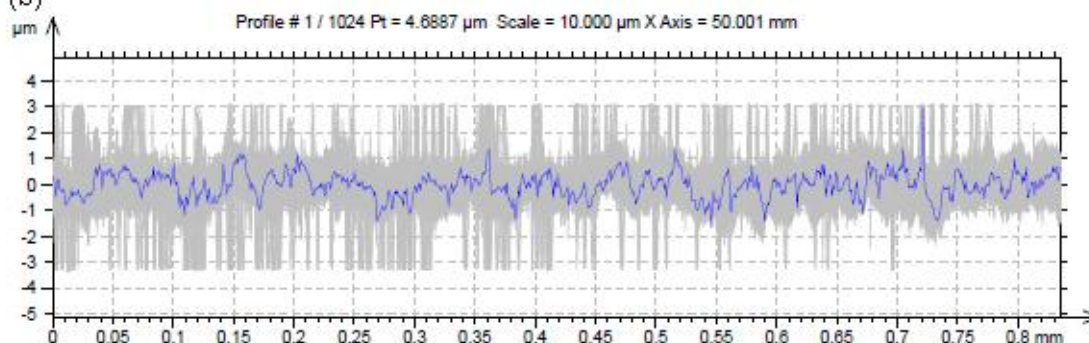
Obr. 5.20 Topografie povrchu a její vyhodnocení pro vzorek č. 2 s polotovarem soustruženým a soustruženým po TZ (a) 3D reliéf povrchu, (b) křivky jednotlivých profilů v řezu, (c) křivka nosného podílu pro parametry objemu, (d) vyhodnocené parametry topografie povrchu.

(a)

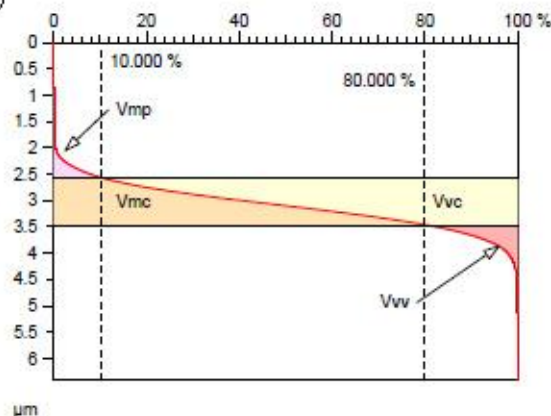
Vzorek č. 3 polotovar rozválcovaný a broušený po TZ



(b)



(c)



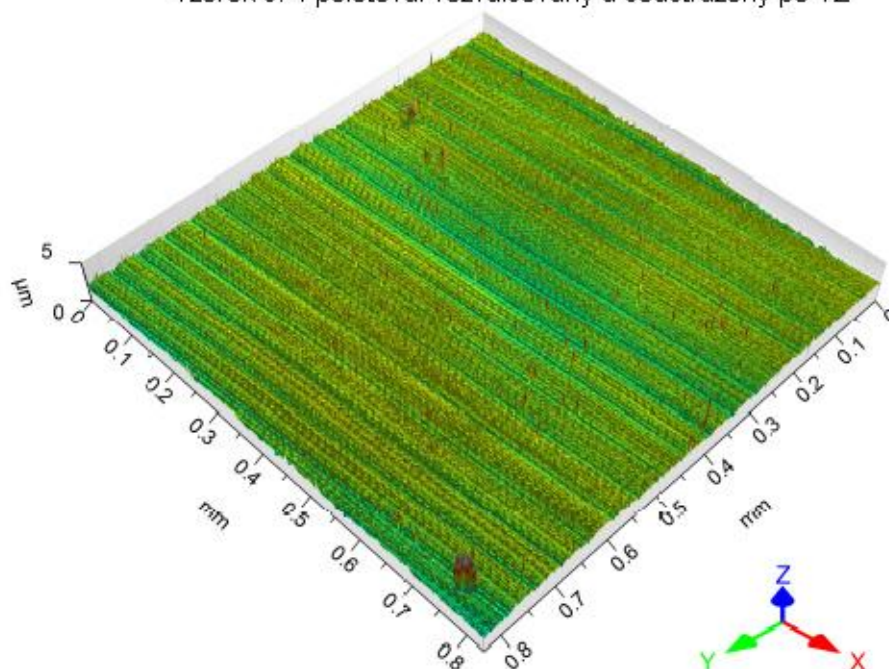
(d)

Parametr	Hodnota
Vvv [mm ³ /mm ²]	0,000051
Vvc [mm ³ /mm ²]	0,00051
Vmp [mm ³ /mm ²]	0,00002
Vmc [mm ³ /mm ²]	0,00038
Pa [μm]	0,36
Pz [μm]	3,94
Pq [μm]	0,46
Ra [μm]	0,34
Rz [μm]	3,5
Rq [μm]	0,44
Sa [μm]	0,34
Sz [μm]	6,4
Sq [μm]	0,43

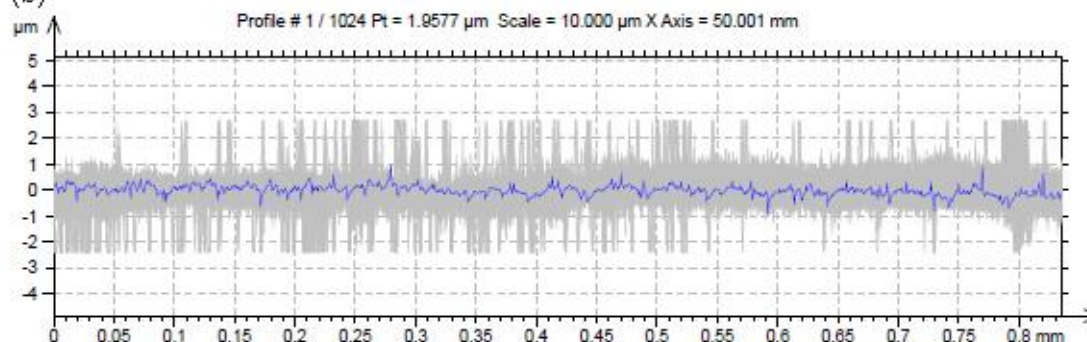
Obr. 5.21 Topografie povrchu a její vyhodnocení pro vzorek č. 3 s polotovarem rozválcovaným a broušeným po TZ (a) 3D reliéf povrchu, (b) křivky jednotlivých profilů v řezu, (c) křivka nosného podílu pro parametry objemu, (d) vyhodnocené parametry topografie povrchu.

(a)

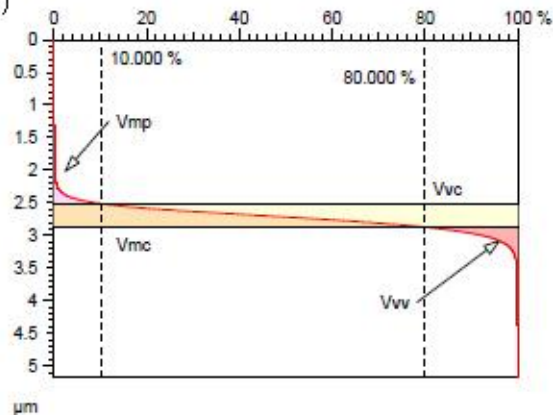
Vzorek č. 4 polotovár rozválcovaný a soustružený po TZ



(b)



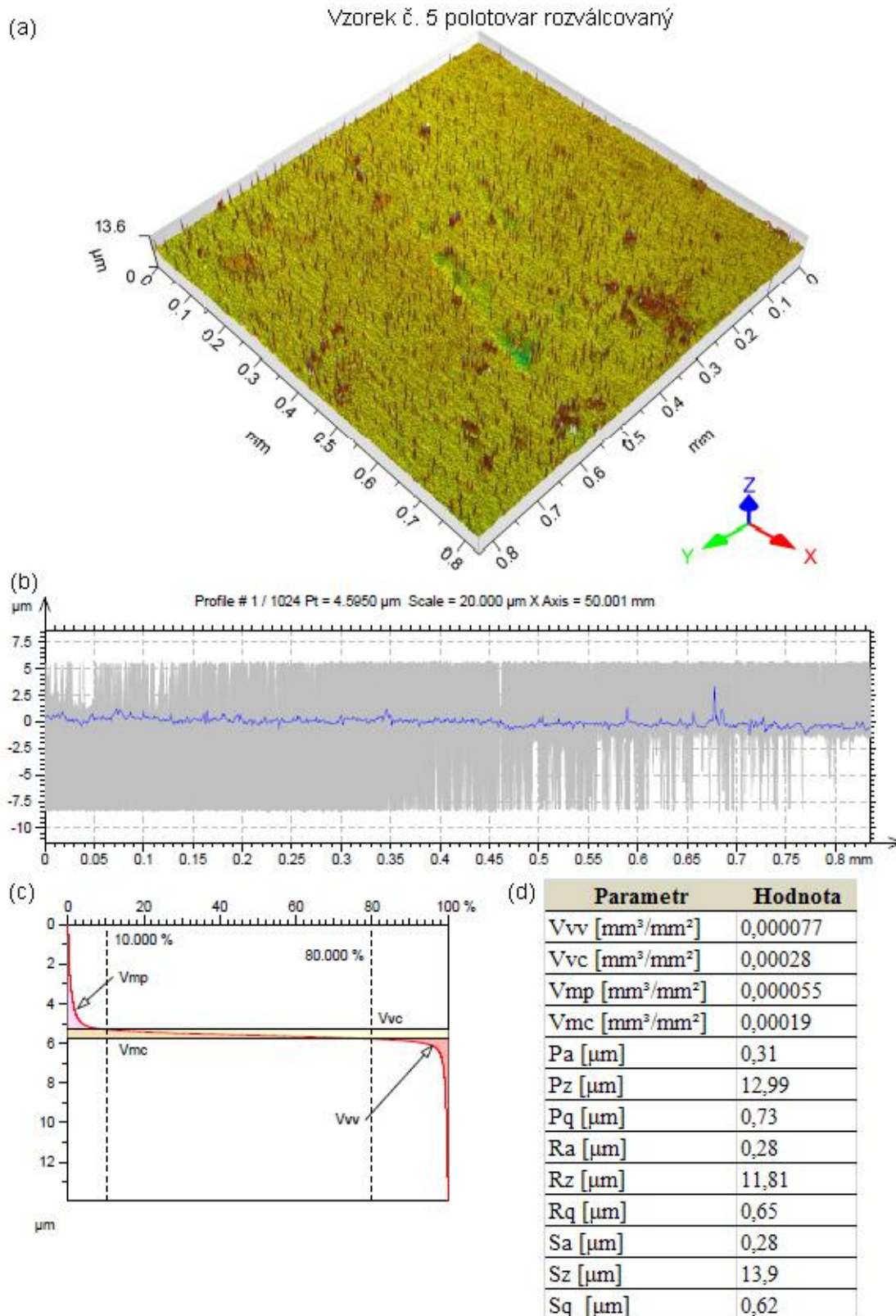
(c)



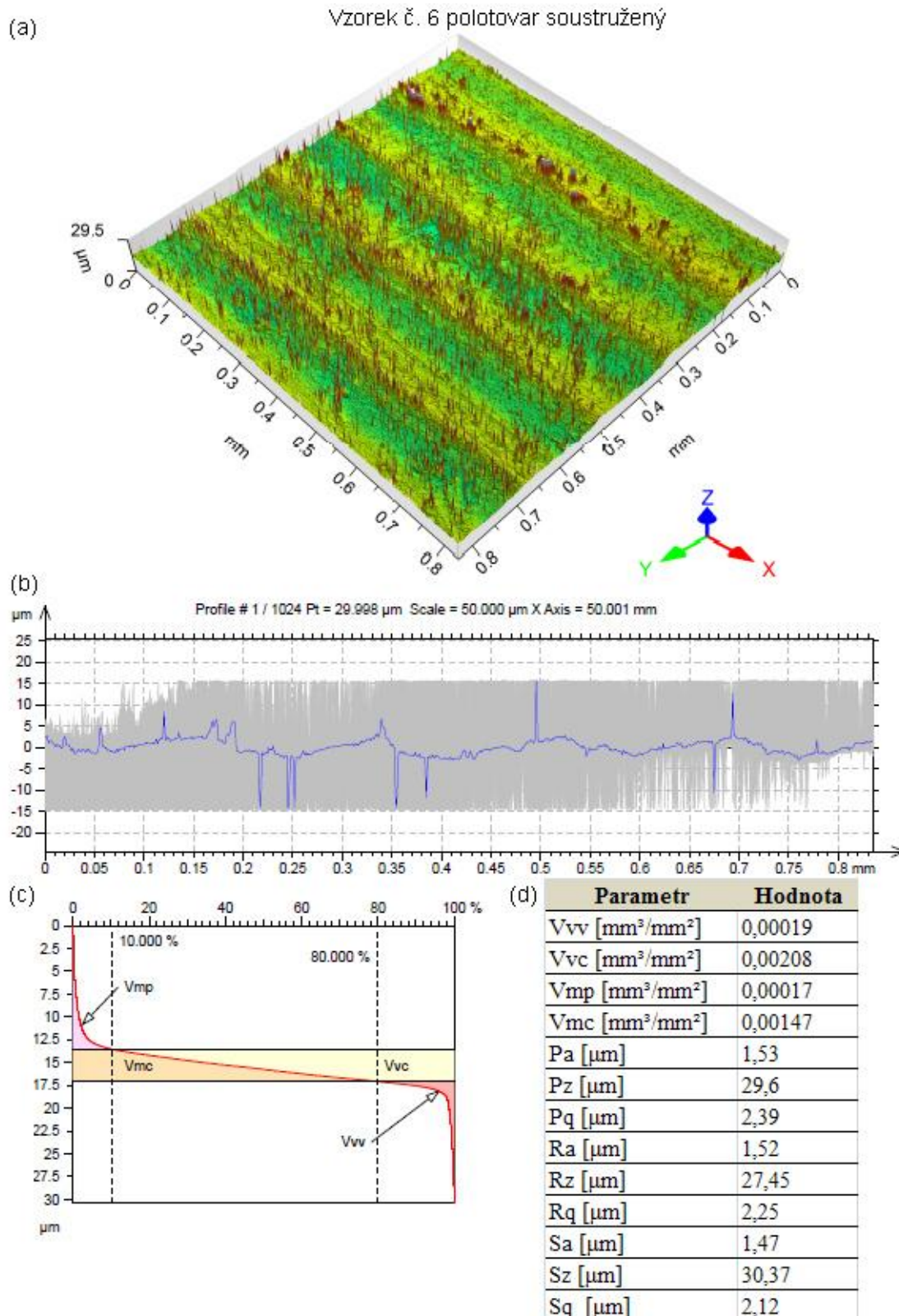
(d)

Parametr	Hodnota
Vvv [mm^3/mm^2]	0,000027
Vvc [mm^3/mm^2]	0,0002
Vmp [mm^3/mm^2]	0,00001
Vmc [mm^3/mm^2]	0,00015
Pa [μm]	0,16
Pz [μm]	2,85
Pq [μm]	0,23
Ra [μm]	0,14
Rz [μm]	2,38
Rq [μm]	0,19
Sa [μm]	0,14
Sz [μm]	5,17
Sq [μm]	0,2

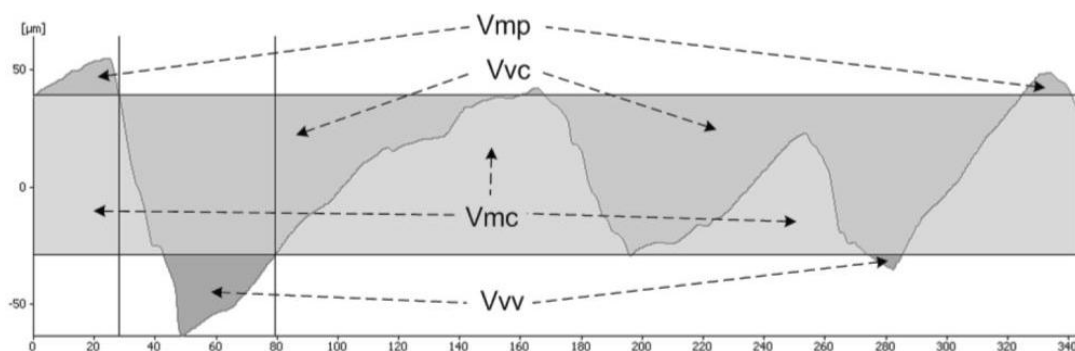
Obr. 5.22 Topografie povrchu a její vyhodnocení pro vzorek č. 4 s polotovarem rozválcovaným a soustruženým po TZ (a) 3D reliéf povrchu, (b) křivky jednotlivých profilů v řezu, (c) křivka nosného podílu pro parametry objemu, (d) vyhodnocené parametry topografie povrchu.



Obr. 5.23 Topografie povrchu a její vyhodnocení pro vzorek č. 5 s polotovarem rozválcovaným (a) 3D reliéf povrchu, (b) křivky jednotlivých profilů v řezu, (c) křivka nosného podílu pro parametry objemu, (d) vyhodnocené parametry topografie povrchu.

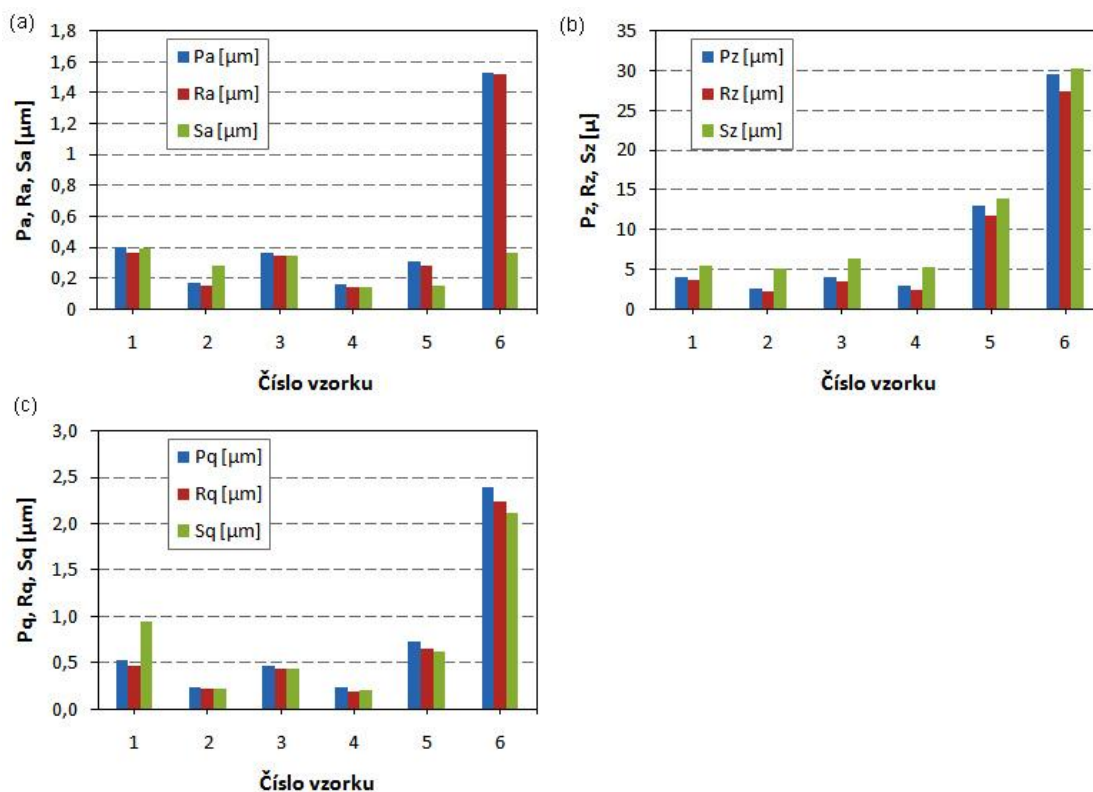


Obr. 5.24 Topografie povrchu a její vyhodnocení pro vzorek č. 6 s polotovarem soustruženým (a) 3D reliéf povrchu, (b) křivky jednotlivých profilů v řezu, (c) křivka nosného podílu pro parametry objemu, (d) vyhodnocené parametry topografie povrchu.



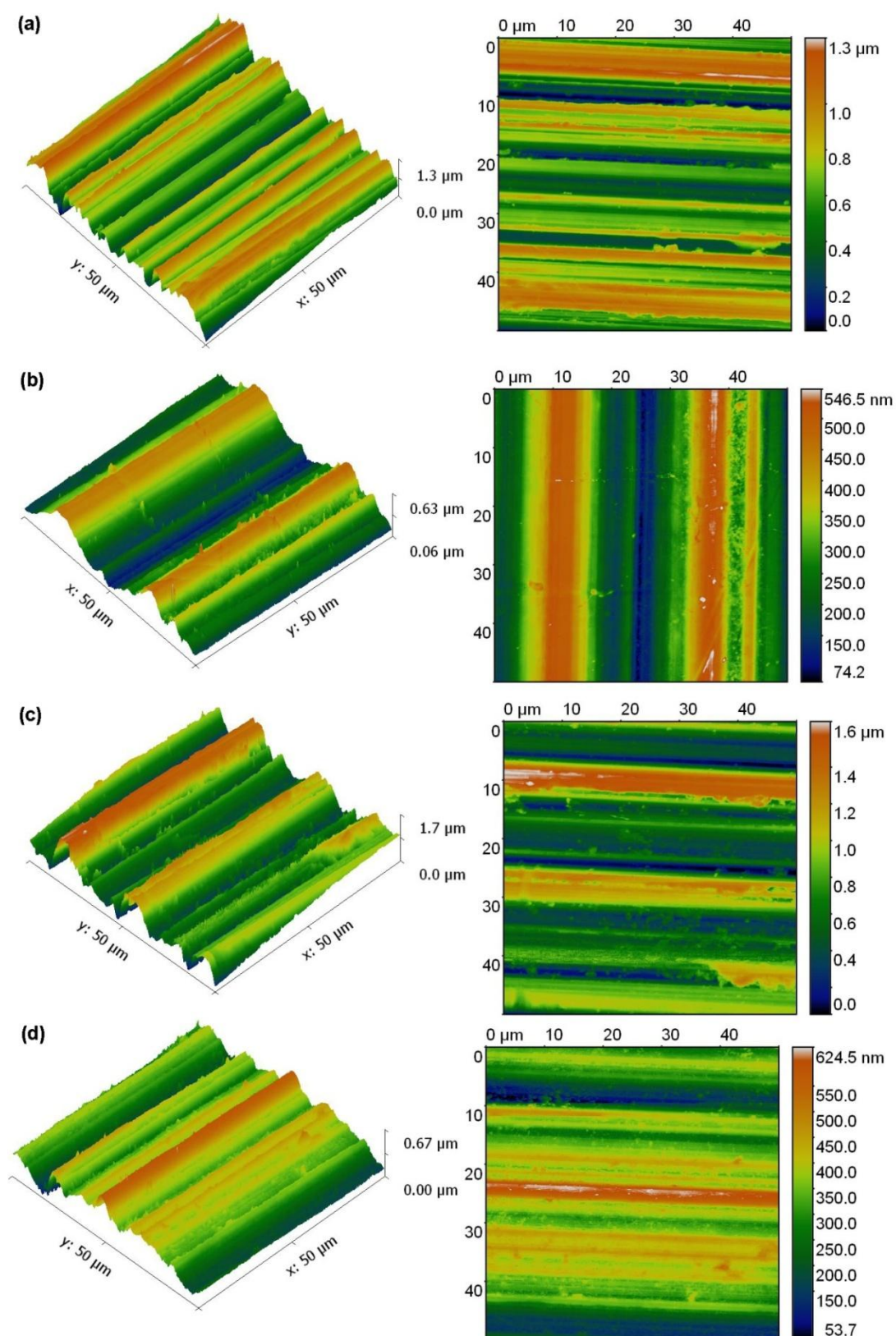
Obr. 5.25 Znázornění souvislosti objemových parametrů křivky nosného podílu s povrchem [91].

Na obrázku 5.26 bylo provedeno vyhodnocení jednotlivých parametrů topografie povrchů všech vyrobených vzorků. Nejnižších hodnot všech studovaných parametrů bylo dosaženo u vzorků č. 2 a 4, jejichž dokončovací operací bylo soustružení po tepelném zpracování. Na těchto dvou vzorcích současně také bude nejlépe ulpívat mazivo, což je pro ložiskové kroužky velmi důležité. Budeme-li posuzovat pouze R_a parametr, tak nejnižší hodnoty tohoto parametru bylo dosaženo u vzorku č. 4 (polotovár rozválcovaný a soustružený po TZ), a to $0,14 \mu\text{m}$. Naopak nejvyšších hodnot většiny studovaných parametrů bylo dosaženo u vzorků č. 5 a 6, které byly pouze soustruženy či rozválcovány před TZ, ale nebyla na nich provedena žádná dokončující operace.



Obr. 5.26 (a-c) vyhodnocené jednotlivé parametry topografie pro experimentální vzorky.

3D reliéf obrobených povrchů byl dále analyzován semikontaktní technikou AFM, která je založena na detekci změn interakčních sil mezi hrotem a povrchem obrobku se změnou vzdálenosti hrotu od povrchu. Měření bylo provedeno v módu Scanasyst a použitým hrotem o poloměru $0.65\text{ }\mu\text{m}$. Vyhodnocovaná plocha měla rozměr $15\times 15\text{ }\mu\text{m}$ a je pro jednotlivé vzorky je znázorněna na obrázku 5.27. Tento detail topografie by měl ze všech použitých zobrazovacích metod nejpřesněji popisovat tvarové charakteristiky na povrchu jednotlivých výstupků a prohlubní, protože tato technika analýzy umožňuje pozorování na úrovni atomů. AFM analýza však neumožňuje studium reálné barvy povrchu, proto byl použit ke znázornění výškových rozdílů barevný filtr. Dále nebylo možné takto zobrazit povrchy vzorků č. 5 a 6, které nebyly obrobeny žádnou dokončovací technologií, protože jejich povrch vykazoval přílišné výškové rozdíly a měřicí hrot by jimi byl zlomen.



Obr. 5.27 3D reliéf povrchu jednotlivých vzorků získaný pomocí AFM (a) vzorek č.1 polotovar soustružený a po TZ broušený, (b) vzorek č.2 polotovar soustružený a po TZ soustružený, (c) vzorek č.3 polotovar rozválcovaný a po TZ broušený, (d) vzorek č.4 polotovar rozválcovaný a po TZ soustružený.

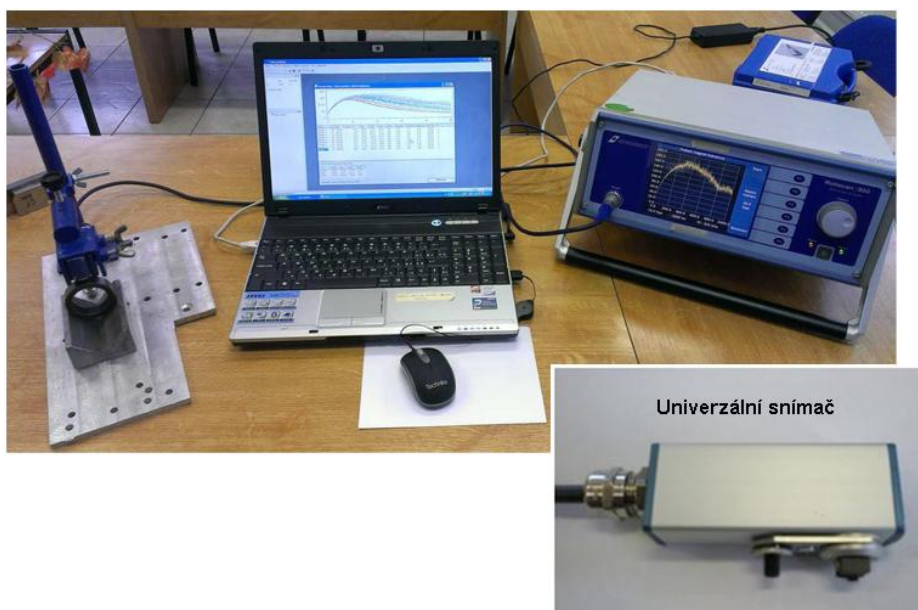
5.6 Vyhodnocení Barkhausenova šumu

Barkhausenův šum (BN) je fyzikální jev, při kterém rozhodující roli sehrává interakce Blochových stěn (BW) (jejich nevratné skoky) s napětovými poli a strukturou vyjádřenou v takových aspektech, jako je hustota dislokací, rozměr zrna, karbidy a jiné feromagnetické a neferomagnetické fáze, zbytkový austenit a podobně. Ze signálů BN a vybraných parametrů extrahovaných z BN je tak možné získat informaci ohledně výše uvedených aspektů. S ohledem na skutečnost, že strategie rozválcování a soustružení před TZ vytvářejí kroužky s odlišným napětovým stavem i stavem struktury před TZ a následně mají tyto operace určitý vliv také na následující operace, byla do této studie implementována také metoda BN jako možný nástroj pro hodnocení stavu povrchů vyjádřených v napětovém, ale především ve strukturním stavu.

Na analýzu integrity povrchu vzorků byla použita nedestruktivní mikromagnetická metoda Barkhausenova šumu. Použitým přístrojem byl Rollscan 350 se softwarem MicroScan 600. Tato nedestruktivní kontrola vzorků se uskutečnila s použitím měřicí sestavy znázorněné na obr. 5.27. V tab. 5.3 jsou uvedeny podmínky experimentu, které byly zvoleny pro analýzu Barkhausenova šumu. Při analýze broušených a soustružených vzorků bylo měření BN realizováno univerzální měřicí sondou, která byla přikládána k povrchu zkoumaného vzorku v tangenciálním směru.

Tab. 5.3 Podmínky pro analýzu BN

Zařízení	Rollscan 350
Analyzovaná frekvence	70 – 200 KHz
Magnetizační napětí	8 V
Magnetizační frekvence	125 Hz
Poloha sondy vůči vzorku	Tangenciální



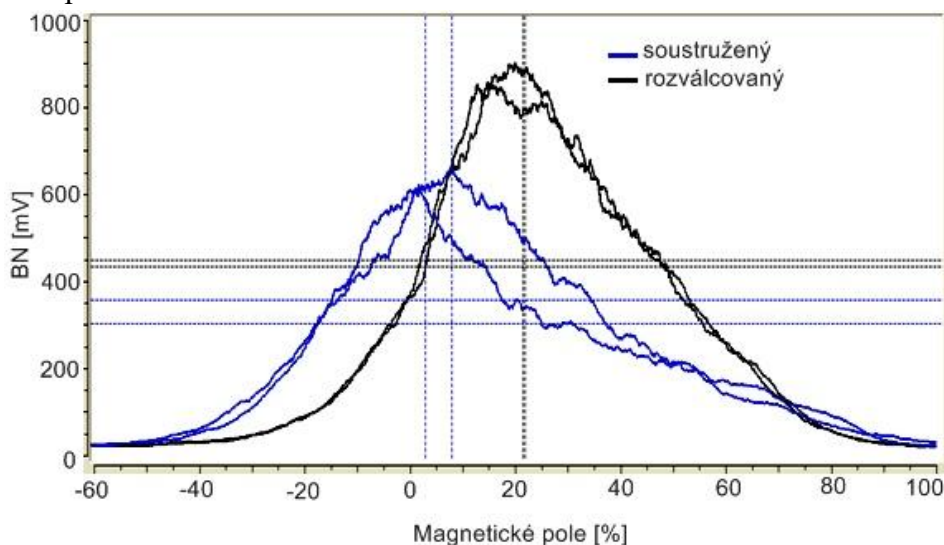
Obr.5.27 – přístroj na měření Barkhausenova šumu + vyhodnocovací software.

Analyzované parametry BN

Prostřednictvím software MicroScan byly analyzovány následující parametry:

- *RMS hodnota* - efektivní hodnota Barkhausenova šumu,
- *Pozice píku (PP)*- tento parametr charakterizuje polohu vrcholu obalové křivky Barkhausenova šumu.

Pomocí uvedeného software byly porovnávány tvary obálkových křivek BN. Analýza byla realizovaná pro všechny stavy zkoumaných kroužků. Měření byla realizována vždy v 8 místech po obvodu kroužku.

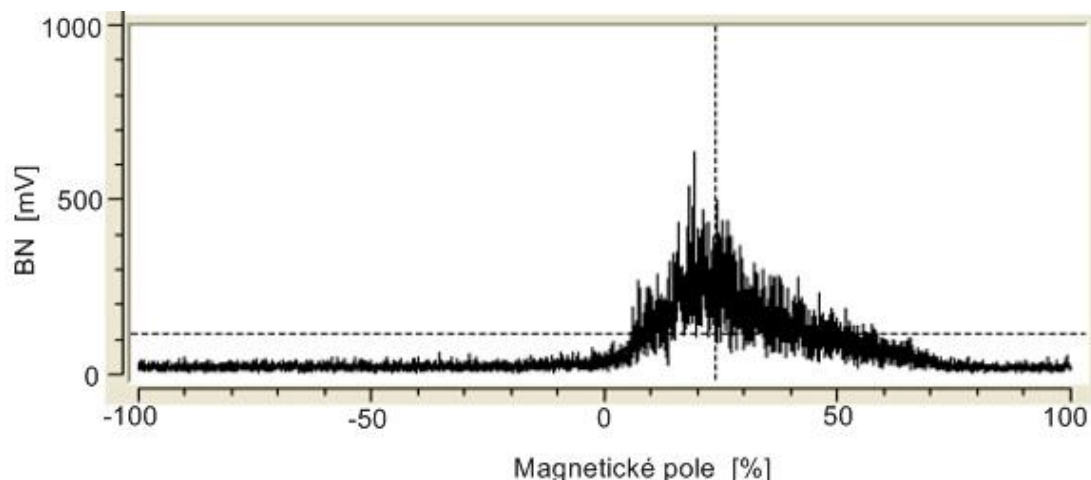


Obr. 5.28 Porovnání BN pro vzorky č. 5 (polotovár rozválcovaný před TZ) a 6 (polotovár soustružený před TZ).

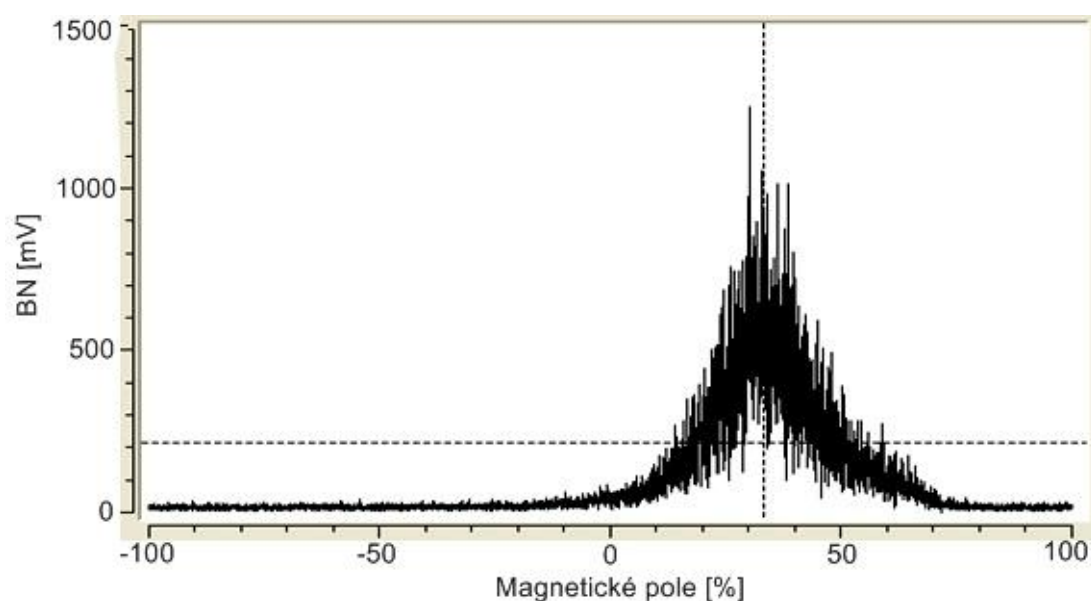
Obr. 5.28 znázorňuje obálky BN pro obě strategie před TZ, což bylo provedeno u vzorků č. 5 a 6. Vyšší magnetická a korespondující mechanická tvrdost souvisí s tím, že poloha vrcholu BN obálky je posunutá do vyšších hodnot H . Takže na to, že došlo k aktivizaci pohybu Blochových stěn, je potřebné silnější magnetické pole vzhledem k tomu, že Blochovy stěny interagují (jsou blokovány) feritickou maticí s vyšší dislokační hustotou (v případě kroužků rozválcovaných před TZ).

Je známo, že procesem plastické deformace se zvyšuje hustota dislokací. Blochovy stěny (BW) interagují s dislokačními buňkami a s rostoucí hustotou dislokací BN hodnoty obvykle klesají, protože dislokace se snaží blokovat jejich pohyb. V tomto případě jsou však BN hodnoty po rozválcování před TZ vyšší v porovnání se soustružením. Tento aspekt souvisí s tím, že feritická matrice je preferenčně orientovaná do směru válcování, a tedy i do směru, ve kterém je BN měřeno. Pokud je při soustružení feritická matrice v zásadě náhodně orientovaná (na povrchu je velmi tenká vrstva, která je stejně tak preferenčně orientovaná do směru měření, avšak její tloušťka je velmi malá a výrazněji se tak do BN hodnot nepromítá). Rozválcováním se tedy z hlediska BN vytváří struktura magneticky (a také mechanicky) tvrdší (vyšší hodnoty

PP), avšak zároveň generující vyšší BN hodnoty v souvislosti s jejím preferenčním přeorientováním do tangenciálního směru.



Obr. 5.29 BN pro vzorek č. 1 s polotovarem soustruženým a broušený po TZ.



Ob

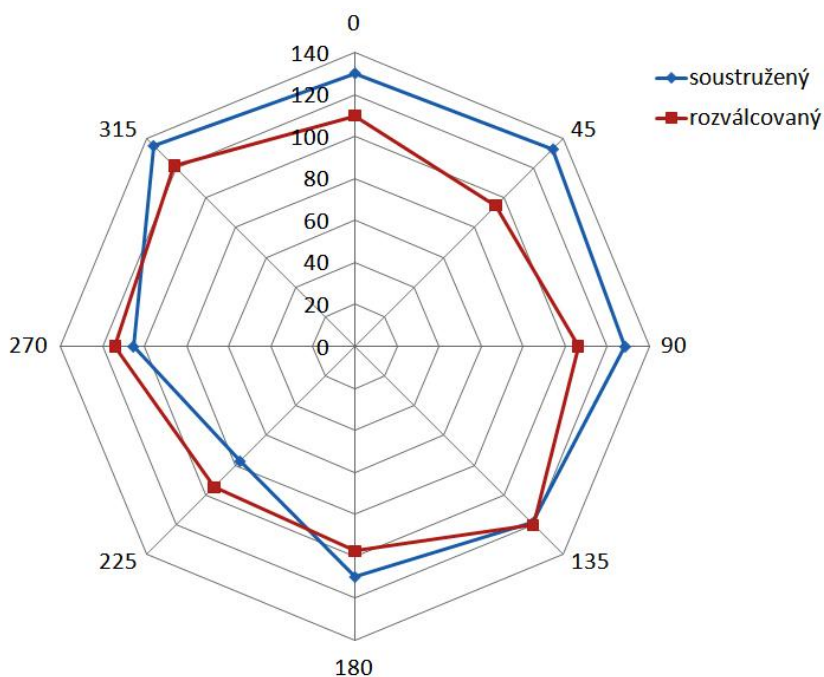
r. 5.30 BN pro vzorek č. 2 s polotovarem soustruženým a soustružený po TZ.

Procesem broušení se BN hodnoty výrazněji nemění v porovnání se stavem po TZ, viz obr. 5.30 a 5.34. Tak jako po TZ, také po broušení jsou BN hodnoty po broušení rozloženy rovnoměrněji na kroužcích po rozválcování před TZ v porovnání se strategií soustružení před TZ, viz obr. 5.34. BN hodnoty po broušení jsou porovnatelné s hodnotami po TZ, což indikuje nízké tepelné zatížení povrchu při broušení, a je ve shodě malou tloušťkou tepelně ovlivněné oblasti a také s tlakovými napětími u obou strategií před TZ.

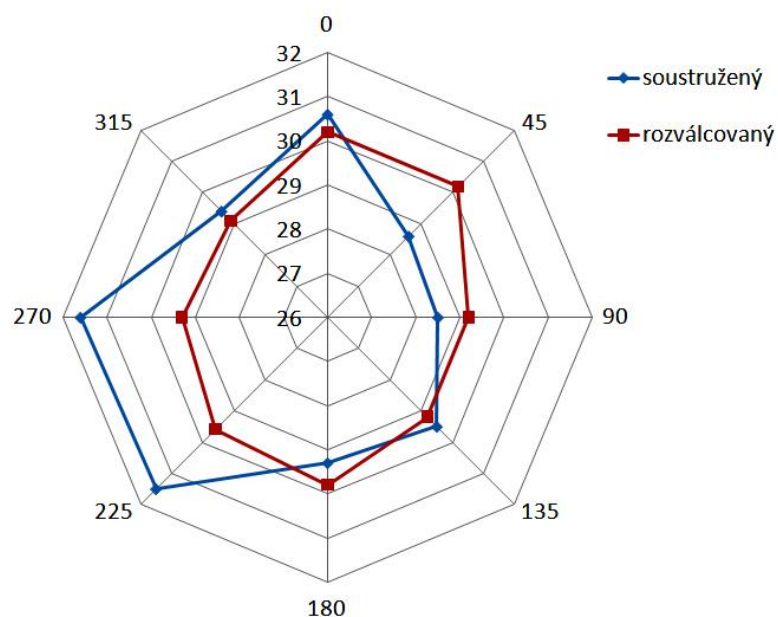
V případě soustružení po TZ jsou BN hodnoty vyšší v porovnání se stavem po kalení, viz obr. 5.30 a 5.33. Je to dáno především tím, že při soustružení po TZ je obrobek vystaven vysokému mechanickému a tepelnému zatížení. Vytváří se proto

martenzitická matrice, která je preferenčně orientovaná do směru řezné rychlosti, tedy do směru měření BN (tangenciální směr). Tento aspekt povrchu je sice kompenzovaný poměrně velkými tlakovými napětími v povrchu (tlaková napětí snižují BN), ale zvýšené BN hodnoty po soustružení po TZ v porovnání s TZ indikují, že efekt preferenční orientace martenzitické matrice dominuje. V souvislosti s deformacemi po TZ a proměnlivou tloušťkou odebírané vrstvy se BN hodnoty mění v poměrně širokém rozsahu, viz obr. 5.33 (1. tříška). V případě 2. třísky, kdy jsou deformace po TZ odstraněny předcházejícím řezem (1. třískou), je řez mnohem stabilnější, a proto jsou také BN hodnoty rozloženy po obvodě rovnoměrněji.

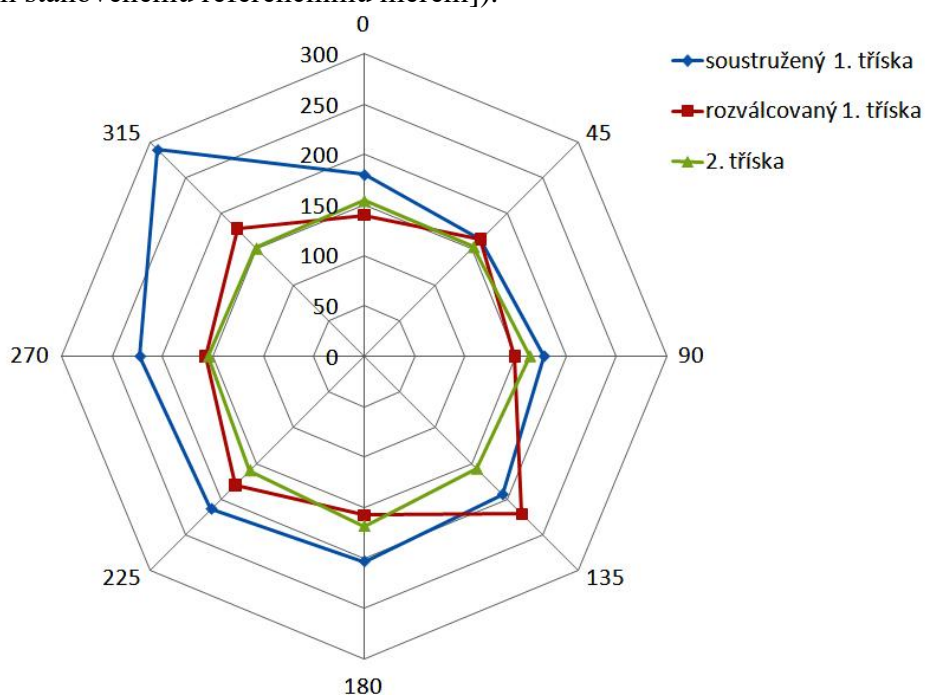
Z hlediska využitelnosti BN techniky na monitorování jednotlivých operací, tj. před TZ, samotného TZ, procesu soustružení po TZ a hlavně broušení se ukazuje to, co už bylo uvedeno v kapitole 4.2 a to, že naměřené hodnoty BN ve většině případů, a téměř pro všechny stavy (operace v technologickém postupu), vykazují menší rozptyl hodnot v souvislosti s opakovanými měřeními po obvodě kroužku, což je výhodné z hlediska jednak samotného monitorování (spolehlivost a interpretace údajů) a jednak z hlediska volby konceptu samotného měření (např. menší počet měření po obvodě při kontrole kroužku a s tím související rychlost měření) a podobně.



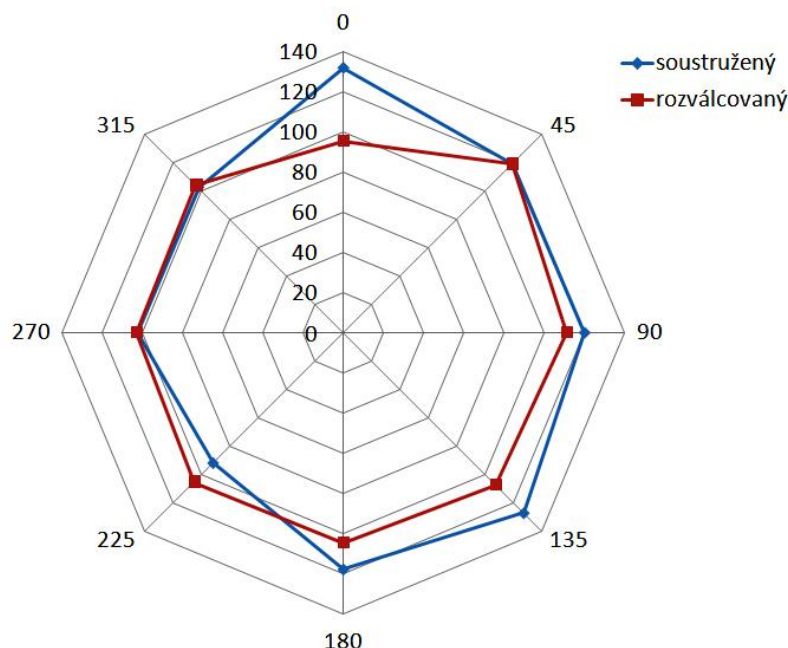
Obr. 5.31 Rozložení BN po obvodu kroužků pro vzorky č. 5 (polotovar rozválcovaný před TZ) a č. 6 (polotovar soustružený před TZ), (po obvodu jednotky ve °, druhá osa BN [mV])



Obr. 5.32 Rozložení hodnot PP pro vzorky č. 5 (polotovar rozválcovaný před TZ) a č. 6 (polotovar soustružený před TZ), (po obvodu jednotky ve °, osa Y představuje sílu magnetického pole [relativní měrná jednotka pro zobrazení poměru množství intenzity, k předem stanovenému referenčnímu měření]).



Obr. 5.33 Rozložení BN po obvodu kroužků pro vzorky č. 2 (polotovar soustružený a soustružený po TZ) a 4 (polotovar rozválcovaný a soustružený po TZ), (po obvodu jednotky ve °, druhá osa BN [mV]).

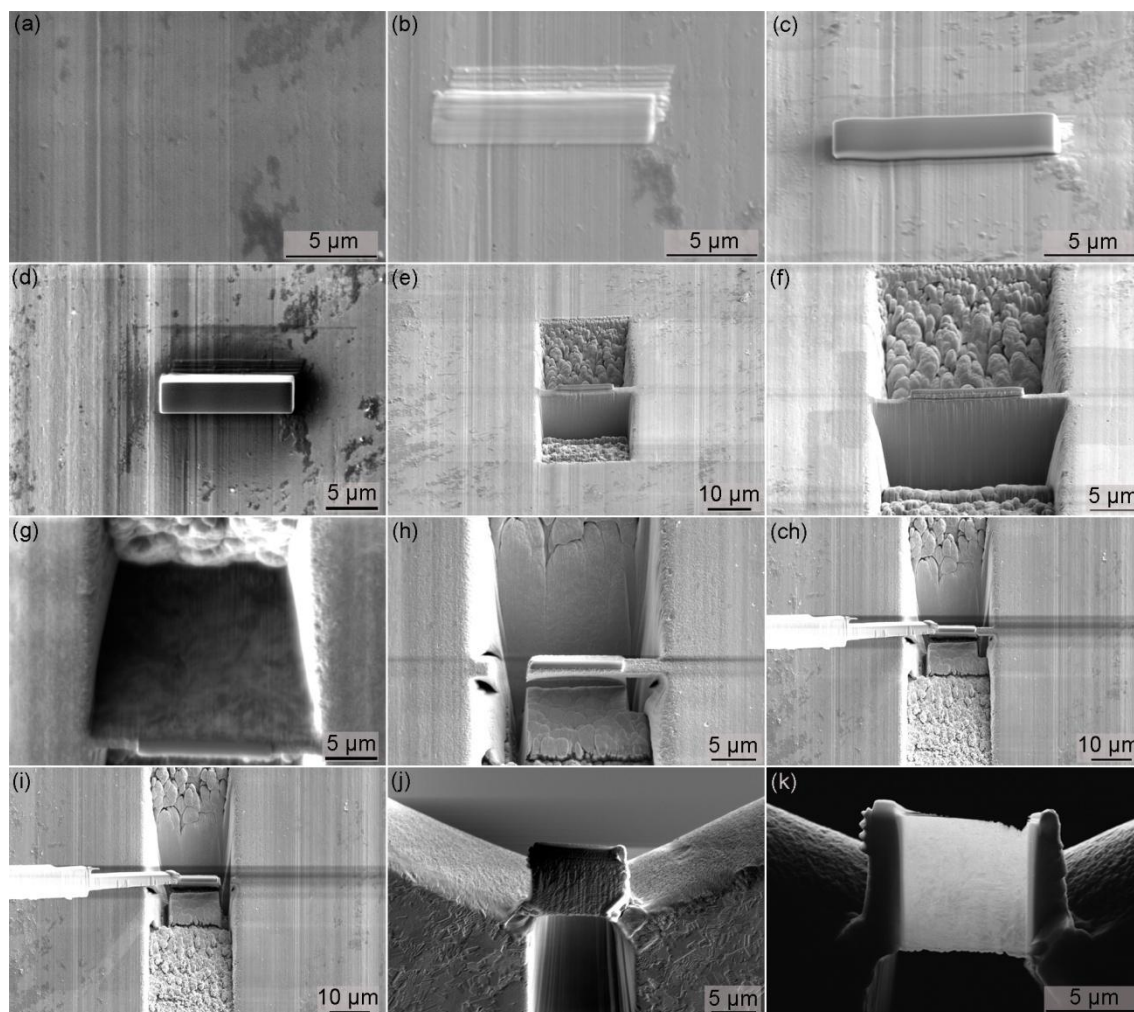


Obr. 5.34 Rozložení BN po obvodu kroužků pro vzorky č. 1 (polotovar soustružený a broušený po TZ) a 3 (polotovar rozválcovaný a broušený po TZ) (po obvodu jednotky ve °, druhá osa BN [mV]).

5.7 Výroba a analýza TEM lamely

Výroba lamel ze vzorků č. 1 (polotovar soustružený a broušený po TZ) a 2 (polotovar soustružený a soustružený po TZ) probíhala pomocí iontového svazku, lokalizované depozice a elektronového svazku a byla určena k studiu v transmisním elektronovém mikroskopu (TEM). Vyrobeny byly pouze 2 lamely, protože náklady na jejich výrobu a následnou analýzu jsou relativně vysoké. Obecně se výroba skládá ze 4 základních kroků. Je to depozice ochranné vrstvy, vytvoření hrubé lamely pomocí iontového svazku, přemístění na měděný držák a finálního ztenčení. Depozice ochranné vrstvy slouží k ochraně materiálu lamely ve zvolené oblasti před iontovým poškozením v průběhu celého výrobního procesu. K depozici prvních 0,2 μm platiny byl použit systém indukované depozice elektronovým svazkem (EBID). Zbývající 2 μm byly nadeponovány pomocí fokusované indukované depozice elektronovým svazkem (FEBID). Výhodou uhlíku oproti platině je jeho vyšší odolnost vůči odprašování. V druhém kroku byl okolo ochranné vrstvy vytvořen pomocí iontového svazku oboustranný příkop o velikosti 12x20x24 μm . Poté byla díky změně náklonu vzorku lamela podřezána a připravena na přenos. K přenosu je zapotřebí tenký wolframový nanomanipulátor, na který je pomocí FIBID připevněna lamela před uvolněním. K uvolnění lamely od základového materiálu byl opět využit iontový svazek. Ve třetím kroku byla lamela pomocí nanomanipulátoru a FIBID připevněna k měděnému držáku. V posledním kroku byla lamela užitím změny uhlu o ± 2 stupně a iontového odprašování ztenčena z počátečních 2 μm na finální 0,2 μm . Kontrola tloušťky lamely byla

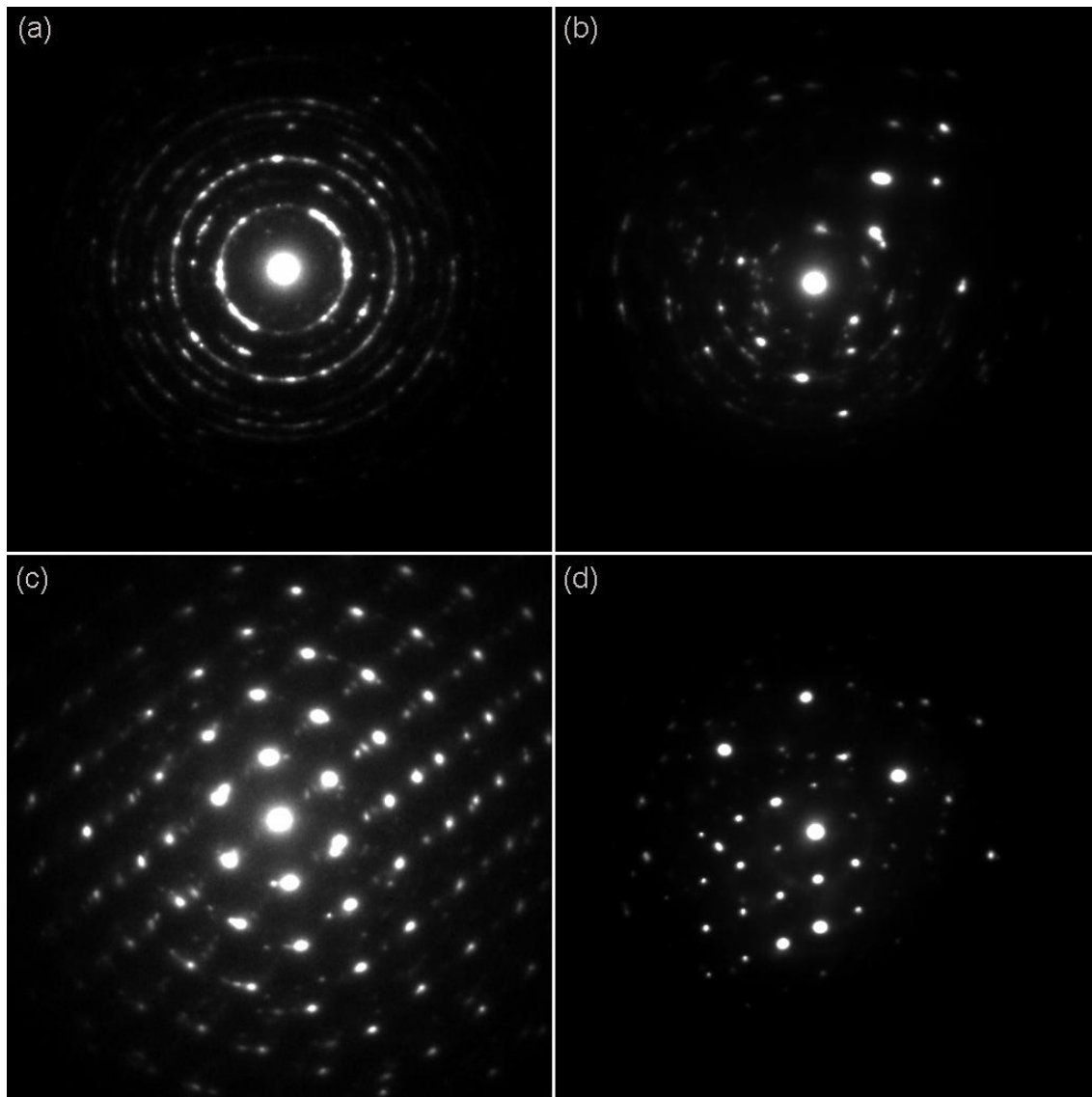
provedena pomocí skenovacího transmisního detektoru (STEM). Na obrázku 5.35 je zobrazen celý proces výroby lamely.



Obr. 5.35 Postup výroby TEM lamely (a) lokalizace místa, (b,c) depozice platiny, (d) depozice uhlíku, (e,f) vyhloubení oboustranného příkopu, (g) podřezání lamely pod náklonem, (h) odřezání jedné strany lamely, (ch) připevnění nanomanipulátoru pomocí FEBID, (i) uvolnění lamely, (j) lamela na měděném drážku, (k) snímek lamely z STEM detektoru.

První provedou analýzou v obou dvou případech bylo studium dopadu obrábění pomocí soustružení nebo broušení na krystalografickou strukturu studovaného materiálu na povrchové (obr. 5.36 (a,b)) a podpovrchové úrovni (obr. 5.36 (c,d)). Z porovnání povrchových difrakčních obrazců je patrné, že v obou dvou případech došlo k změně krystalické struktury z polykrystalické na částečně amorfni. Rozdíl mezi krystalickou a amorfni vrstvou se projevuje změnou výsledného zobrazení. Amorfni vrstva se vyznačuje spojitými kruhy. Oproti tomu polykrystalická jednotlivými tečkami. Kromě částečné amorfizace je zřejmé, že obrábění pomocí broušení mělo větší amorfizační účinek než soustružení. Z porovnání podpovrchových vrstev v difrakčním režimu je patrné, že se jednalo o polykrystalický materiál s velmi malými zrny. Určitou míru

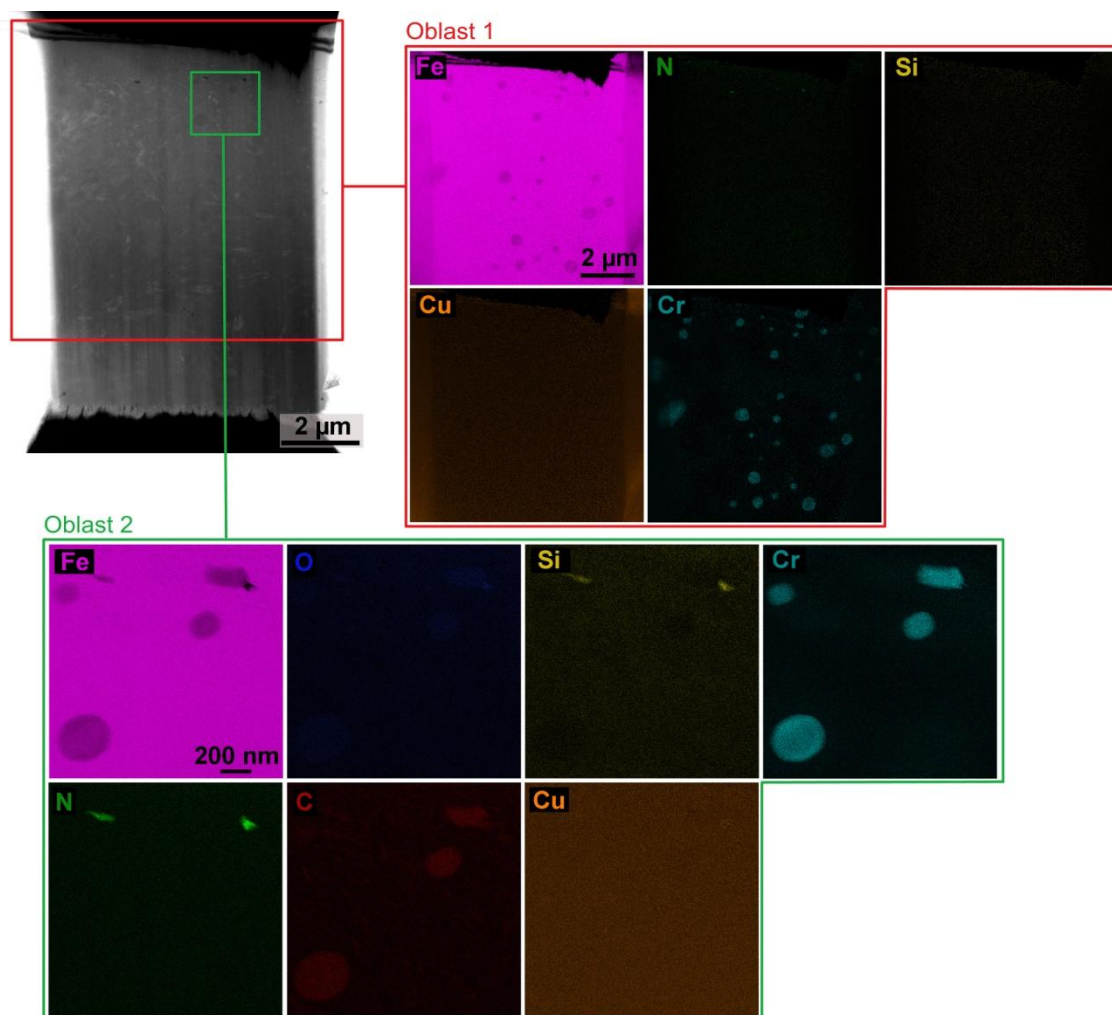
pravidelnosti v pozorovaném difrakčním obrazci podpovrchové vrstvy na obráběném vzorku lze pravděpodobně vysvětlit jako signál od jednoho dominujícího polykrystalu. Z tohoto důvodu se jednotlivé difrakční obrazce shodují pouze v polykrystalickém charakteru a ne v celkové polykrystalické orientaci.



Obr. 5.36 (a) difrakční obrazec povrchu vzorku č. 1 (polotovar soustružený a broušený po TZ), (b) difrakční obrazec povrchu vzorku č. 2 (polotovar soustružený a soustružený po TZ), (c) difrakční obrazec povrchové vrstvy vzorku č. 1 (polotovar soustružený a broušený po TZ), (d) difrakční obrazec povrchové vrstvy vzorku č. 2 (polotovar soustružený a soustružený po TZ).

Lokální analýza chemického složení a studium lamel z hlediska krystalografie proběhlo v transmisním elektronovém mikroskopu. Vzhledem ke stejnému chemickému složení stačilo provést lokální chemickou analýzu pouze lamely ze vzorku č. 1 (polotovar soustružený a broušený po TZ). K lokální analýze chemického složení byly provedeny 2 skeny, což je patrné z obrázku 5.37. První sken byl zaměřen na celkové chemické složení lamely. Druhý sken analyzoval oblast s chromovými částicemi, které se

vyskytovaly s tmavými částicemi korelujícími s výskytem dusíku v celkovém skenu. Z druhého měření lokálního chemického složení je patrné, že chromové částice byly dále navázány atomy kyslíku a dusíku. K navázání mohlo dojít buď v průběhu výroby nebo z atmosféry po vytvoření lamel. Složení tmavých částic na snímku zkoumané oblasti bylo identifikováno jako nitrid křemíku.



Obr. 5.37 Vyrobená lamela ze vzorku č. 1 a dvě oblasti zkoumání pro analýzu chemického složení.

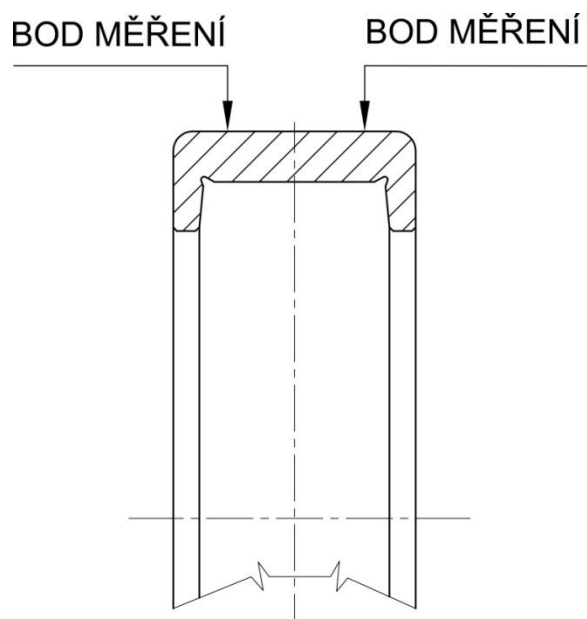
6 ALTERNATIVNÍ METODA RENTGENOVÉ DIFRAKTOMETRIE

Výsledky měření lze ověřit alternativní metodou rentgenové difraktometrie na přístroji iXRD KOVT Stress Measurement System – viz obr. 6.1. Vzhledem ke skutečnosti, že VUT v Brně, FSI touto měřicí technologií zatím nedisponuje, bylo měření provedeno ve spolupráci se Strojnickou fakultou Žilinské university v Žilině.



Obr. 6.1 Rentgenový difraktometr IBRD.

Pro toto měření byly použity jiné vzorky než v předchozí kapitole. Jednalo se konkrétně o polotovary soustružené z trubek před TZ z materiálu 100Cr6 o tvrdosti 59-63 HRC s martenzitickou strukturou. Byly použity kroužky ve dvou rozměrech, a to s vnějším průměrem 140 mm (6 ks) a s vnějším průměrem 180 mm (2 ks), přičemž měřicí body jsou znázorněny na obrázku 6.2. Měření bylo opakovaně provedeno na vnějším průměru kroužků tak, jak je znázorněno na obrázku.



Obr. 6.2 Body měření na povrchu kroužků.

Výsledky rentgenové difraktometrie získané pomocí vyhodnocovacího programu přístroje jsou uvedeny v příloze č. 1. a rámcově potvrzují měření pomocí BH. Jednotlivým vzorkům byly přiřazeny následující čísla měření dle tabulky 6.1.

Tab. 6.1 Přiřazení počítačových výstupů vzorkům

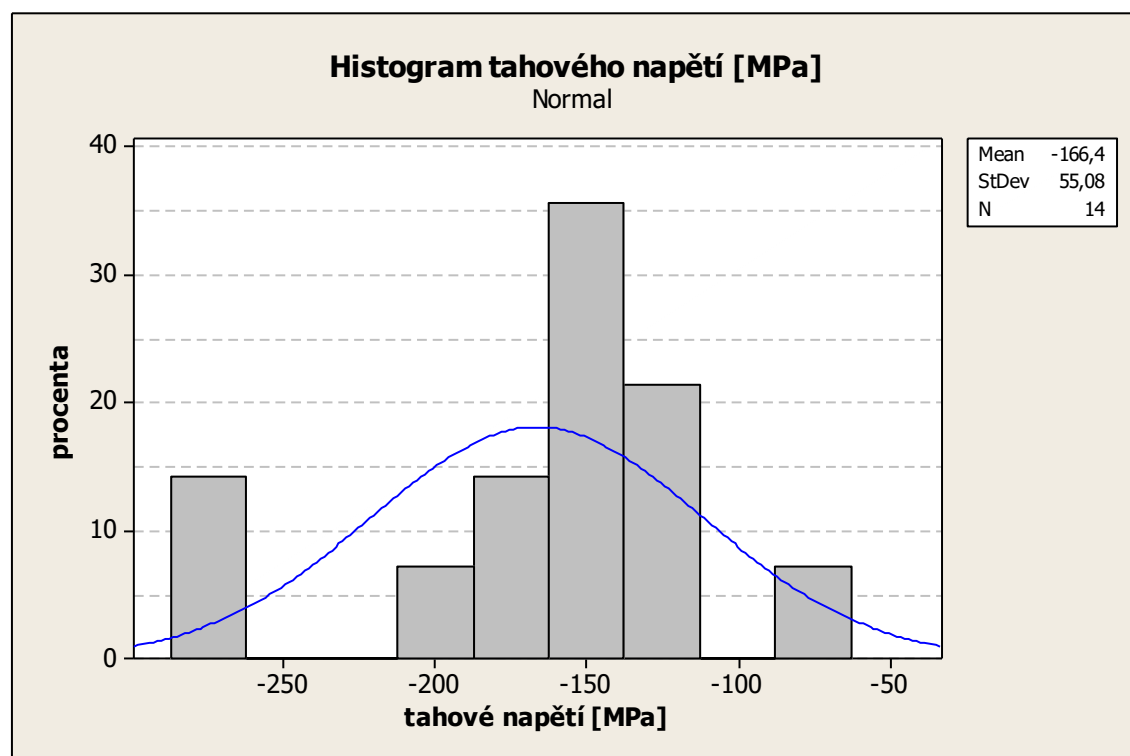
Č. vzorku	Průměr kroužku [mm]	Přiřazený výstup měření
1	140	5_ I, 5_ II
2		5_ III, 5_ IV
3		7_ I, 7_ II
4		7_ III, 7_ IV
5		8_ I, 8_ II
6		8_ III, 8_ IV
7	180	3_ I
8		3_ II

Výsledky provedené rentgenové difraktometrie experimentů jsou uvedeny v tabulce tab. 6.2.

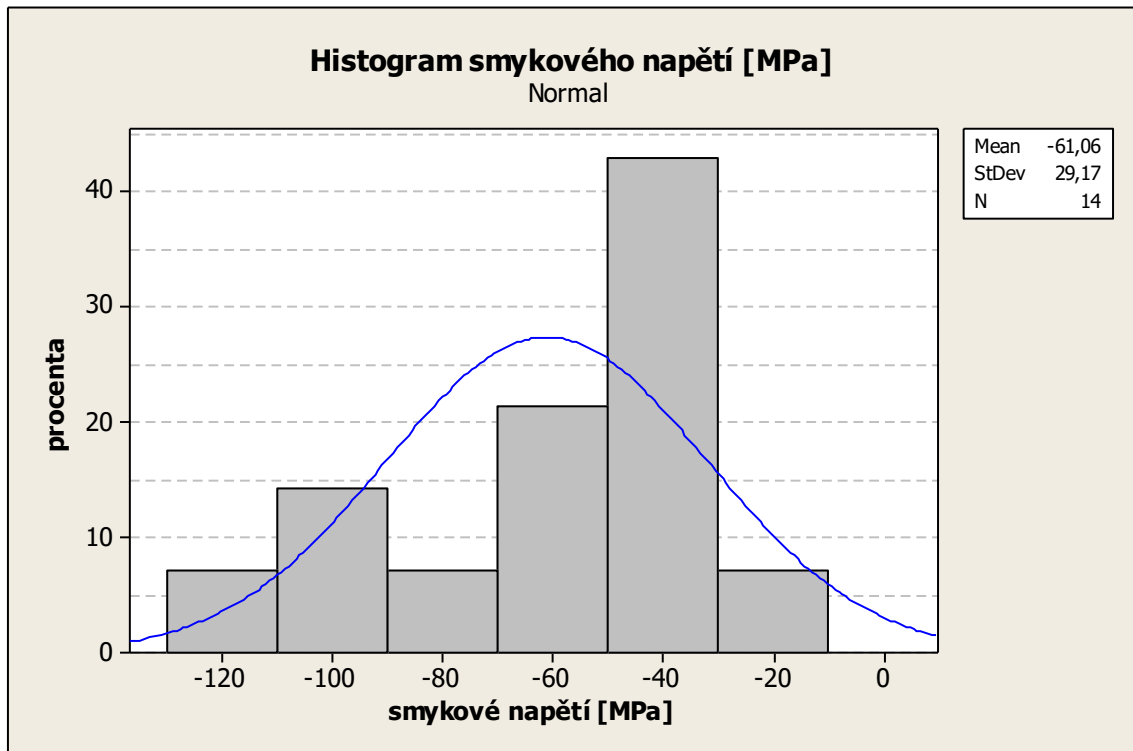
Tab. 6.2 Výsledky měření rentgenové difraktometrie

Měření	Záznam	Tahové napětí [MPa]	Smykové napětí [MPa]
1	5_I	-131,4 +/- 17,8	-96,4 +/- 9,2
2	5_II	-77,3 +/- 25,8	-97,4 +/- 13,4
3	5_III	-275,8 +/- 16,8	-88,8 +/- 8,7
4	5_IV	-119,8 +/- 25,4	-126,4 +/- 13,2
5	7_I	-140,7 +/- 17,7	-54,8 +/- 9,2
6	7_II	-150,9 +/- 17,6	-49,1 +/- 9,2
7	7_III	-137,1 +/- 22,8	-44,8 +/- 11,8
8	7_IV	-158,7 +/- 14,9	-47,0 +/- 7,8
9	8_I	-200,9 +/- 20,5	-33,2 +/- 10,4
10	8_II	-153,1 +/- 13,4	-29,3 +/- 6,7
11	8_III	-277,6 +/- 18,3	-51,9 +/- 9,2
12	8_IV	-153,9 +/- 19,8	-41,1 +/- 9,8
13	3_I	-187,1 +/- 23,2	-56,3 +/- 11,6
14	3_II	-165,1 +/- 17,8	-38,3 +/- 8,9

Histogramy četnosti zastoupení jednotlivých hodnot tahového a smykového napětí jsou zobrazeny na obr. 6.3 a obr. 6.4.



Obr. 6.3 Histogram tahového napětí.



Obr. 6.4 Histogram smykového napětí.

Vstupními hodnotami pro zpracování histogramů jsou jmenovité hodnoty napětí z tabulky z tab.6.2 a zpracování bylo provedeno ve statistickém programu Minitab 15. Z obr. 6.3 a 6.4 vyplývá, že napětí se vyskytuje vždy v záporných hodnotách, a tedy tlakové i s ohledem na velikost tolerance jednotlivých měření. Tato skutečnost je z hlediska integrity povrchu ložiskových kroužků velmi důležitá. Střední hodnota u tahového napětí je -166,4 MPa a u smykového napětí -61,06 MPa. V obou případech je rozptyl okolo střední hodnoty značný a poněkud lepší průběh je u tahového napětí.

7 ZÁVĚRY

Tato práce byla detailně zaměřena na analýzu funkčních ploch ložiskových kroužků v souvislosti s technologií jejich výroby. Jako základní technologické procesy byly zvoleny technologie rozválcování a soustružení před TZ, broušení a především soustružení po tepelném zpracování. Součástí práce bylo provedení komplexní rešeršní studie dané problematiky zaměřující se především na nové technologie při výrobě ložisek a studium jakosti obrobených ploch.

Předmětem experimentální části této práce bylo zkoumání vlastností povrchů zkušebních vzorků, přičemž bylo dosaženo následujících závěrů:

- analýza mikrostruktury v příčném řezu vzorky neprokázala výrazné rozdíly mezi soustruženými a broušenými vzorky; pouze v případě těch broušených se na povrchu nacházela poměrně tenká tepelně popuštěná oblast,
- studium mikrotvrdomosti experimentálních vzorků nepřineslo žádné viditelné rozdíly v tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu,
- rozdíl ve zpracování polotovaru před TZ (soustružení nebo rozválcování) nemá významný vliv na profil zbytkových napětí po soustružení po TZ, v případě broušení po TZ profily zbytkových napětí indikovaly poměrně nízké tepelné zatížení broušeného povrchu (shodně pro soustružení i rozválcování před TZ) což znamená, že řezné podmínky byly zvoleny správně,
- ze studia morfologie povrchu pomocí SEM vyplývá, že soustružené vzorky po TZ (vzorek č. 2 a 4) mají morfologii výrazně hladší než vzorky broušené a nejsou na ní patrné téměř žádné stopy po nástroji,
- v povrchové ani podpovrchové vrstvě vzorků nebyly studovány žádné defekty v podobě trhlin,
- nejnižších hodnot zkoumaných parametrů topografie povrchu bylo dosaženo u vzorků soustružených po TZ, přičemž i na těchto vzorcích bude nejlépe ulpívat mazivo,
- po broušení jsou (Barkhausenův šum) BN hodnoty rozloženy rovnoměrněji na kroužcích po rozválcování před TZ v porovnání se strategií soustružení před TZ, dále také BN hodnoty po broušení jsou porovnatelné s hodnotami po TZ, což indikuje nízké tepelné zatížení povrchu při broušení, v případě soustružení po TZ jsou BN hodnoty vyšší v porovnání se stavem po tepelném zpracování,
- alternativní metoda rentgenové difraktometrie (XRD) rámcově potvrdila výsledky měření Barkhausenova šumu,
- na základě analýzy TEM lamely je zřejmé, že dokončovací operace broušení mělo větší amorfizační účinek než soustružením po TZ.

Z výše uvedených skutečností je zřejmé, že dokončovací technologie soustružení po tepelném zpracování může dosáhnout srovnatelných či lepších výsledků než broušení, a to především z hlediska integrity povrchu. Vliv operací před TZ (soustružení nebo rozválcování) na výsledné vlastnosti funkčních ploch ložiskového kroužku nebylo možné zcela zhodnotit, neboť v mnoha analýzách tato předchozí operace nehrála

významnější

roli.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Collis, D. J. (1991). A resource-based analysis of global competition: the case of the bearings industry. *Strategic management journal*, 12(S1), 49-68.
- [2] Beswick, J. M. (2007). *Bearing Steel Technology: Advances and State of the Art in Bearing Steel Quality Assurance. 7th Volume* (No. 1465). ASTM International.
- [3] Avraham, H. (2002). *Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and Lubrication* (Dekker Mechanical Engineering) ISBN: 0-8247-0703-6.
- [4] Harris, T. A. (2001). *Rolling bearing analysis*. John Wiley and sons, ISBN: 0-471-35457-0.
- [5] Evans, R. D., Hager Jr, C. H., Kang, Y. S., & Doll, G. L. (2015). Comparison of black oxide and tungsten carbide–reinforced diamond-like carbon (WC/aC: H) surface treatments for rolling element bearings. *Tribology Transactions*, 58(3), 444-453.
- [6] Wang, L. R. W. L., Snidle, R. W., & Gu, L. (2000). Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research. *Wear*, 246(1-2), 159-173.
- [7] Wang, L. R. J. K., Wood, R. J. K., Harvey, T. J., Morris, S., Powrie, H. E. G., & Care, I. (2003). Wear performance of oil lubricated silicon nitride sliding against various bearing steels. *Wear*, 255(1-6), 657-668.
- [8] Sakai, T., Sato, Y., & Oguma, N. (2002). Characteristic S–N properties of high-carbon–chromium-bearing steel under axial loading in long-life fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 25(8-9), 765-773.
- [9] Akiniwa, Y., Miyamoto, N., Tsuru, H., & Tanaka, K. (2006). Notch effect on fatigue strength reduction of bearing steel in the very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*, 28(11), 1555-1565.
- [10] Laurent, O., Bellus, J., Puech, S., Devilder, F., & Benbahmed, A. (2015). Review of XD15NW (Through Hardening) and CX13VDW (Case Carburizing) Cost-Effective Corrosion Resistant Bearing Steels Grades. In *Bearing Steel Technologies: 10th Volume, Advances in Steel Technologies for Rolling Bearings*. ASTM International.
- [11] Davim, J. P. (2011). *Machining of hard materials*. Springer Science & Business Media, ISBN: 978-1-84996-449-4.
- [12] Grzesik, W. (2008). *Machining of hard materials*. Springer, London, ISBN: 978-1-84800-212-8.
- [13] Hoffman, P. J., Hopewell, E. S., Janes, B., & Sharp Jr, K. M. (2012). *Precision machining technology*. Cengage Learning, ISBN: 978-1-2854-4454-3.
- [14] Klocke, F., & Kuchle, A. (2011). *Manufacturing Processes 1: Cutting*. RWTH Edition, ISBN: 978-3-642-11978-1.
- [15] Fnides, B., Yallese, M. A., & Aouici, H. (2008). Hard turning of hot work steel AISI H11: Evaluation of cutting pressures, resulting force and temperature. *Mechanics*, 72(4), 59-63.
- [16] Knight, W. A., & Boothroyd, G. (2005). *Fundamentals of metal machining and machine tools* (Vol. 198). CRC Press, ISBN: 978-1-57444-659-3.

- [17] Low, M. I. (1998). *Advanced Ceramic Tools for Machining Application-III* (Key Engineering Materials). Trans Tech Publications, ISBN: 978-0878497683
- [18] Benga, G. C., & Abrao, A. M. (2003). Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. *Journal of materials processing technology*, 143, 237-241.
- [19] Kumar, A. S., Durai, A. R., & Sornakumar, T. (2006). Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. *Tribology International*, 39(3), 191-197.
- [20] Kostoglou, N., Polychronopoulou, K., & Rebholz, C. (2015). Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets. *Vacuum*, 112, 42-45.
- [21] Sekkal, W., Bouhafs, B., Aourag, H., & Certier, M. (1998). Molecular-dynamics simulation of structural and thermodynamic properties of boron nitride. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(23), 4975.
- [22] Zhi, C., Bando, Y., Tang, C., Kuwahara, H., & Golberg, D. (2009). Large-scale fabrication of boron nitride nanosheets and their utilization in polymeric composites with improved thermal and mechanical properties. *Advanced Materials*, 21(28), 2889-2893.
- [23] Vel, L., Demazeau, G., & Etourneau, J. (1991). Cubic boron nitride: synthesis, physicochemical properties and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 10(2), 149-164.
- [24] Chen, Y. I. (Ed.). (2015). *Nanotubes and nanosheets: functionalization and applications of boron nitride and other nanomaterials*. CRC Press, ISBN: 978-1-4665-9810-2.
- [25] Liew, W. Y. H., Ngoi, B. K. A., & Lu, Y. G. (2003). Wear characteristics of PCBN tools in the ultra-precision machining of stainless steel at low speeds. *wear*, 254(3-4), 265-277.
- [26] Sahin, Y., & Motorcu, A. R. (2008). Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 26(2), 84-90.
- [27] Gopalsamy, B. M., Mondal, B., & Ghosh, S. (2009). Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel.
- [28] Qian, L., & Hossan, M. R. (2007). Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 274-278.
- [29] Yallese, M. A., Chaoui, K., Zeghib, N., Boulanouar, L., & Rigal, J. F. (2009). Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 1092-1104.
- [30] Krar, S. F., & Gill, A. (2003). *Exploring advanced manufacturing technologies*. Industrial Press, ISBN: 0-8311-3150-0.
- [31] Schwartz, M. (2016). *Encyclopedia and Handbook of Materials, Parts and Finishes*. CRC press, ISBN: 978-1-138-03206-4.
- [32] Poulachon, G., Moisan, A., & Jawahir, I. S. (2001). Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. *Wear*, 250(1-12), 576-586.
- [33] Kurt, A., & Şeker, U. (2005). The effect of chamfer angle of polycrystalline cubic boron nitride cutting tool on the cutting forces and the tool stresses in finishing hard turning of AISI 52100 steel. *Materials & design*, 26(4), 351-356.

-
- [34] Kishawy, H. A., & Elbestawi, M. A. (2001). Tool wear and surface integrity during high-speed turning of hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 215(6), 755-767.
- [35] Humár, A. (2004): *Technologie I - Základní metody obrábění - 1. část*. Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. [online], [2018-12-02]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>.
- [36] Rowe, W. B. (2013). *Principles of modern grinding technology*. William Andrew, ISBN: 978-0-323-24271-4.
- [37] Davis, J. R. (Ed.). (1995). *ASM specialty handbook: tool materials*. ASM international, ISBN: 978-0-87170-545-7.
- [38] Malkin, S., & Guo, C. (2008). *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. Industrial Press, ISBN: 978-0-8311-3247-7.
- [39] Rao, P. N. (2013). *Manufacturing technology: metal cutting and machine tools* (Vol. 2). Tata McGraw-Hill Education, ISBN: 0-07-463843-2.
- [40] Dornfeld, D. (2008). *Precision Manufacturing*. Springer Science, ISBN: 978-0-387-32467-8.
- [41] Barbacki, A., Kawalec, M., & Hamrol, A. (2003). Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel. *Journal of materials processing technology*, 133(1-2), 21-25.
- [42] Tawakoli, T., Hadad, M. J., & Sadeghi, M. H. (2010). Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(8), 698-708.
- [43] Abrão, A. M., & Aspinwall, D. K. (1996). The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. *Wear*, 196(1-2), 279-284.
- [44] Sadeghi, M. H., Hadad, M. J., Tawakoli, T., Vesali, A., & Emami, M. (2010). An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique. *International Journal of Material Forming*, 3(4), 241-251.
- [45] Kwak, J. S., Sim, S. B., & Jeong, Y. D. (2006). An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4), 304-312.
- [46] Mao, C., Zhou, Z., Zhang, J., Huang, X., & Gu, D. (2011). An experimental investigation of affected layers formed in grinding of AISI 52100 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5-8), 515-523.
- [47] Wang, J. (1999). *Abrasive Technology: Current Development and Applications I: the Third International Conference on Abrasive Technology:(ABTEC'99)*, Brisbane, Australia, World Scientific, ISBN: 981-02-4161-5.
- [48] King, R. I., & Hahn, R. S. (2012). *Handbook of modern grinding technology*. Springer Science & Business Media, ISBN: 978-1-4613-1965-8.
- [49] Sachsel, H. G. (2010). *Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive and Superabrasive*. Xlibris Corporation, ISBN: 978-1-4535-4027-5.
- [50] Shi, Z., & Malkin, S. (2006). Wear of electroplated CBN grinding wheels. *Journal of manufacturing science and engineering*, 128(1), 110-118.
-

- [51] Herman, D., & Krzos, J. (2009). Influence of vitrified bond structure on radial wear of cBN grinding wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(14), 5377-5386.
- [52] Guo, C., Shi, Z., Attia, H., & McIntosh, D. (2007). Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56(1), 343-346.
- [53] Ding, W. F., Xu, J. H., Chen, Z. Z., Su, H. H., & Fu, Y. C. (2010). Wear behavior and mechanism of single-layer brazed CBN abrasive wheels during creep-feed grinding cast nickel-based superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(5-8), 541-550.
- [54] Wenfeng, D., Jiuhua, X., Zhenzhen, C., Honghua, S., & Yucan, F. (2010). Grindability and surface integrity of cast nickel-based superalloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels. *Chinese Journal of Aeronautics*, 23(4), 501-510.
- [55] Fujimoto, M., Ichida, Y., Sato, R., & Morimoto, Y. (2006). Characterization of wheel surface topography in cBN grinding. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 49(1), 106-113.
- [56] Jackson, M. J. (2007). Sintering and vitrification heat treatment of cBN grinding wheels. *Journal of materials processing technology*, 191(1-3), 232-234.
- [57] Ding, W. F., Xu, J. H., Chen, Z. Z., Yang, C. Y., Song, C. J., & Fu, Y. C. (2013). Fabrication and performance of porous metal-bonded CBN grinding wheels using alumina bubble particles as pore-forming agents. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1309-1315.
- [58] Jackson, M. J., & Hitchiner, M. P. (2012). *High performance grinding and advanced cutting tools*. Springer Science & Business Media, ISBN: 978-1-4614-3115-2.
- [59] Hitchiner, M. P., Marinescu, I. D., Uhlmann, E., Rowe, W. B., & Inasaki, I. (2016). *Handbook of machining with grinding wheels*. CRC Press, ISBN: 978-1-4822-0670-8.
- [60] Klocke, F. (2009). *Manufacturing processes. Volume 2, Grinding, honing, lapping*. Springer, ISBN: 978-3-540-92259-9.
- [61] Jin, T., & Stephenson, D. J. (2006). Analysis of grinding chip temperature and energy partitioning in high-efficiency deep grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(5), 615-625.
- [62] Hecker, R. L., Liang, S. Y., Wu, X. J., Xia, P., & Jin, D. G. W. (2007). Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(5-6), 449-459.
- [63] Setti, D., Sinha, M. K., Ghosh, S., & Rao, P. V. (2015). Performance evaluation of Ti-6Al-4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 88, 237-248.
- [64] Kukie, L., & Kustra, J. (2003). Numerical analysis of thermal phenomena and deformations in processing zone in the centerless continuous grinding process. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 39.
- [65] Hassui, A., & Diniz, A. E. (2003). Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8), 855-862.

-
- [66] Mannan, M. A., Drew, S. J., Stone, B. J., & Wager, J. G. (2000). Torsional vibration effects in grinding?. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 49(1), 249-252.
- [67] Chen, J., Fang, Q., & Li, P. (2015). Effect of grinding wheel spindle vibration on surface roughness and subsurface damage in brittle material grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 91, 12-23.
- [68] Drew, S. J., Mannan, M. A., Ong, K. L., & Stone, B. J. (2001). The measurement of forces in grinding in the presence of vibration. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(4), 509-520.
- [69] Totten, G. E. (Ed.). (2002). *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM international, ISBN: 0-87170-729-2.
- [70] Noyan, I. C., & Cohen, J. B. (2013). *Residual stress: measurement by diffraction and interpretation*. Springer, ISBN: 978-1-4613-9571-3.
- [71] Hamdi, H., Zahouani, H., & Bergheau, J. M. (2004). Residual stresses computation in a grinding process. *Journal of materials processing technology*, 147(3), 277-285.
- [72] Bunch, J. O., & Mitchell, M. R. (2007). Residual stress effects on fatigue and fracture testing and incorporation of results into design. ASTM, ISBN: 78-0-8031-4472-9.
- [73] Youtsos, A. (2006). *Residual Stress and its Effects on Fatigue and Fracture*. Netherlands: Springer, ISBN: 978-1-4020-5328-3.
- [74] Schajer, G. S. (Ed.). (2013). *Practical residual stress measurement methods*. John Wiley & Sons, 978-1-118-34237-4.
- [75] Kuntz, M. C. (2001). *Barkhausen noise: Simulations, experiments, power spectra, and two-dimensional scaling*.
- [76] Moorthy, V., Shaw, B. A., Mountford, P., & Hopkins, P. (2005). Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised En36 steel. *Acta Materialia*, 53(19), 4997-5006.
- [77] Vashista, M., & Paul, S. (2008). Study of the effect of process parameters in high-speed grinding on surface integrity by Barkhausen noise analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(12), 1625-1637.
- [78] Kojima, F., Takagi, T., & Udpa, S. S. (Eds.). (2002). *Electromagnetic nondestructive evaluation (VI)* (Vol. 6). IOS press, ISBN: 58603-245-3.
- [79] Fujiwara, H., Abe, T., & Tanaka, K. (Eds.). (1992). *Residual Stresses III: Science and technology two volume set*. CRC Press, ISBN: 1-85166-857-8.
- [80] Ochodek, V. Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. In: *6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6*, 9-10 July 2007, France, ISBN 951- 98400-7-9.
- [81] Jiles, D. (2015). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. CRC press, ISBN: 978-1-4822-3888-4.
- [82] Wojtas, A. Analysis of residual stresses after shotpeening. *Strojírenská technologie*, roč. 11, č. 3, ISSN 1211-4162.
- [83] Zhu, Y. (Ed.). (2005). *Modern techniques for characterizing magnetic materials*. Springer Science & Business Media, ISBN: 1-4020-8007-7.
- [84] Getzlaff, M. (2007). *Fundamentals of magnetism*. Springer Science & Business Media, ISBN: 978-3-540-31150-8.
- [85] Touzani, R., & Rappaz, J. (2014). Mathematical Models for Eddy Currents and Magnetostatics. *Mathematical Models for Eddy Currents and Magnetostatics*:
-

- With Selected Applications, Scientific Computation.* Springer ISBN 978-94-007-0201-1.
- [86] Davim, J. P. (Ed.). (2010). *Surface integrity in machining* (Vol. 1848828742). London: Springer, ISBN: 978-1-84882-873-5.
- [87] Ondráček, E., Farlík, A. (1973): *Mezní stavy v pevnostních výpočtech*. SNTL, Praha.
- [88] Piška, M. et al. (2009) *Speciální technologie obrábění*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [89] Neckar, F. (1985). *Influence of cutting process on surface integrity*. Research report 400, CVUT Praha.
- [90] ALICONA GmbH. *IF-MeasureSuite*: Version 5.1. Graz, Austria, 2013.

9 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Jednotka	Popis proměnné
a	[mm]	vzdálenost ramene měřicího třmenu
a_p	[mm]	Šířka záběru hlavního ostří nástroje
$\alpha = \beta$	[°]	úhel rozpětí
AFM	[-]	mikroskop atomárních sil
b	[mm]	šířka kroužku
BN	[-]	Barkhausenův šum
E	[N.mm ⁻²]	modul pružnosti v tahu
EBID	[-]	indukovaná depozice elektronovým svazkem
EDX	[-]	energieově-disperzní detektor rentgenového záření
f	[mm]	posuv na otáčku
FEBID	[-]	fokusovaná indukovaná depozice elektronovým svazkem
h	[mm]	tloušťka kroužku
H	[A/m]	intenzita magnetického pole
Hc	[A/m]	koercitivní síla
HRC	[-]	zkouška tvrdosti podle Rockwella
J	[mm ⁴]	moment setrvačnosti průřezu kroužku
KNB	[-]	kubický nitrid bóru
l	[mm]	délka kroužku
LM	[-]	světelná mikroskopie
M	[N]	vnitřní síla ve vrstvě
n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
Pa	[μm]	průměrná aritmetická úchylka základního profilu
Pq	[μm]	průměrná kvadratická úchylka základního profilu
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
Pz	[μm]	největší výška základního profilu
r	[mm]	poloměr kroužku
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti

Rq	[μm]	průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti
Rz	[μm]	největší výška profilu drsnosti
RTG	[-]	rentgen; rentgenové
Sa	[μm]	aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
SjF, KOVT	[-]	strojírenská fakulta; Katedra obrábění a výrobní techniky
SE	[-]	detektor sekundárních elektronů
SEM	[-]	rastrovací elektronový mikroskop
STEM	[-]	skenovací transmisní detektor
Sq	[μm]	základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
Sz	[μm]	maximální výška omezené stupnice povrchu
t	[mm]	tloušťka povlaku
TEM	[-]	transmisní elektronový mikroskop
TZ, TS	[-]	tepelné zpracování
v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	řezná rychlost
Vmc	[mm^3/mm^2]	objem jádra materiálu na povrchu s omezenou stupnicí
Vmp	[mm^3/mm^2]	objem vrcholů materiálu na povrchu s omezenou stupnicí
Vvc	[mm^3/mm^2]	materiálem nevyplněný objem jádra na povrchu s omezenou stupnicí
Vvv	[mm^3/mm^2]	materiál nevyplněný objemem údolí na povrchu s omezenou stupnicí
Δx	[mm]	tloušťka odleptané vrstvy
Δy	[mm]	součet deformací
Δy_1	[mm]	deformace od momentu vnitřních sil
Δy_2	[mm]	deformace prodloužením kroužku
Δy_3	[mm]	deformace tahovým napětím a pootočením třmenu
σ	[MPa]	napětí po odleptání vrstvy
φ	[°]	doplňkový úhel

10 VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

- [1] SEDLÁK, J.; FIŠEROVÁ, Z.; CHLADIL, J.; ZEMČÍK, O.; DVOŘÁČEK, J. (2013): *The Influence of Lubricants on the Durability of Roller Bearings*. Journal Proceedings in Manufacturing Systems, Bucarest, roč. 8, č. 4, p. 213-220. ISSN: 2067-9238.
- [2] FIŠEROVÁ, Z., OTOUPALÍK, J. (2014): *Surface Layer Properties after Turning Hardened Bearing Steel*. In ERIN, 8th International conference for Young Researchers and Ph.D. Students. Litera Brno: Brno University of Technology, p.1-5. ISBN: 978-80-214-4931- 2.
- [3] OTOUPALÍK, J.; FIŠEROVÁ, Z. (2014): *Rolling Deformation of Bearing Steels*. In ERIN, 8th International Conference for Young Researchers and Ph.D. Students. Litera Brno: Brno University of Technology, p. 1-7. ISBN: 978-80-214-4931- 2.
- [4] OSIČKA, K., FIŠEROVÁ, Z., OTOUPALÍK, J. (2015): *Influence of Cutting Tool Overhangs at Machining of Hardened Steels*. Manufacturing Technology, vol. 15, no. 2, p. 188-191, ISSN: 1213-2489.
- [5] FIŠEROVÁ, Z., OTOUPALÍK, J., NESLUŠAN, M., KOLAŘÍK, K. (2015): *Implementation of Cold Rolling Process in Bearing Industry*. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201526, ISSN: 1805-0476.
- [6] OSIČKA, K., FIŠEROVÁ, Z., OTOUPALÍK, J., CHLADIL, J. (2017): *Tension of the Surface Layer in Machining Hardened Steels*. Manufacturing Technology, vol. 17, no. 1, p. 72-76, ISSN: 1213-2489.

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 Výsledky rentgenové difraktometrie STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0015

Description: č.3_I

Stress = -187.1 ± 23.2 MPa

ShearStress = -56.3 ± 11.6 MPa

Intensity Ratio: 1.16 1.20
Average Peak Breadth: 5.71 ± 0.32 4.86 ± 0.27
Average Peak FWHM: 5.054 ± 0.34 4.352 ± 1.48

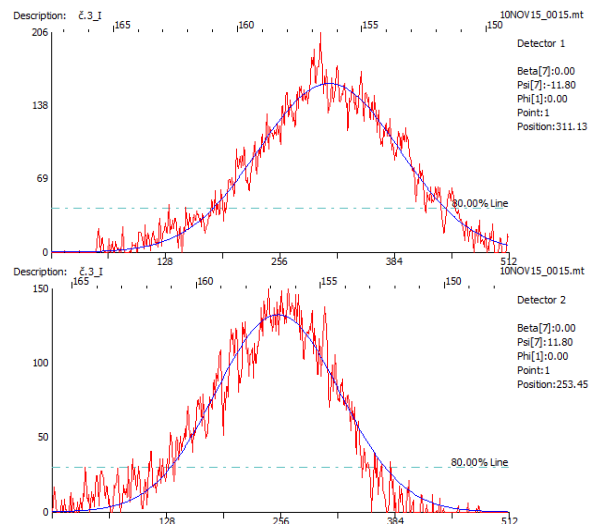
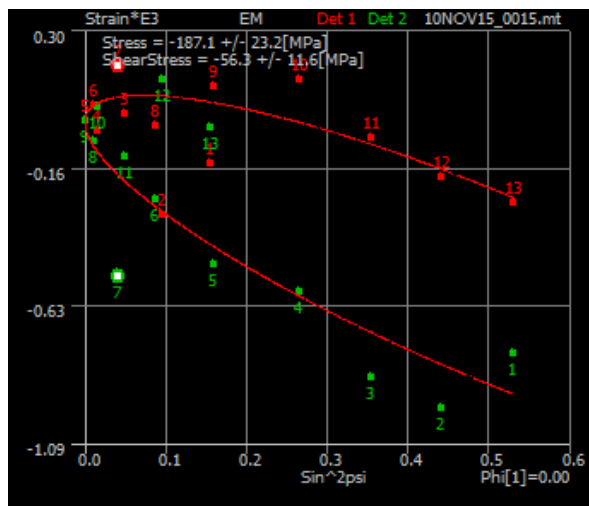
Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	23.20	0.1553	1.170037	156.49	-0.147	5.076	6.15	188.25
29.92	18.12	0.0968	1.169833	156.59	-0.321	5.104	5.85	183.54
24.73	12.93	0.0501	1.170237	156.40	0.024	5.383	5.84	186.30
19.23	7.44	0.0167	1.170166	156.43	-0.037	5.438	5.68	181.73
11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	5.054	5.70	190.86
5.52	-6.28	0.0120	1.170271	156.38	0.054	5.601	6.10	177.33
0.00	-11.80	0.0418	1.170428	156.31	0.187	5.250	5.42	206.46
-5.52	-17.31	0.0886	1.170184	156.42	-0.021	5.287	5.94	181.84
-11.80	-23.59	0.1602	1.170346	156.35	0.117	4.718	5.34	190.72
-19.23	-31.03	0.2657	1.170373	156.33	0.140	4.640	5.85	184.67
-24.73	-36.52	0.3542	1.170141	156.44	-0.058	4.846	5.83	195.81
-29.92	-41.71	0.4428	1.169984	156.52	-0.192	4.449	4.99	198.58
-35.00	-46.80	0.5313	1.169884	156.56	-0.278	4.858	5.53	184.22

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	46.80	0.5313	1.169282	156.85	-0.792	4.490	4.55	166.59
29.92	41.71	0.4428	1.169064	156.95	-0.978	4.688	4.66	176.44
24.73	36.52	0.3542	1.169192	156.89	-0.869	5.018	4.94	167.40
19.23	31.03	0.2657	1.169530	156.73	-0.580	-0.496	4.62	171.28
11.80	23.59	0.1602	1.169637	156.68	-0.488	5.155	5.02	164.08
5.52	17.31	0.0886	1.169898	156.56	-0.266	5.212	4.91	170.68
0.00	11.80	0.0418	1.169588	156.70	-0.530	4.833	5.37	150.19
-5.52	6.28	0.0120	1.170129	156.45	-0.068	4.885	5.10	164.56
-11.80	0.00	0.0000	1.170208	156.41	-0.000	4.532	4.80	173.20
-19.23	-7.44	0.0167	1.170261	156.39	0.045	4.614	4.69	172.59

-24.73	-12.93	0.0501	1.170066	156.48	-0.122	4.809	5.28	170.54
-29.92	-18.12	0.0968	1.170368	156.34	0.136	4.322	4.54	180.80
-35.00	-23.20	0.1553	1.170182	156.42	-0.023	4.519	4.68	176.48



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha
Wavelength: 2.291
KV:20.00; mA:4.00
Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;
Exp. time: 1.00 1.00
Nr of exp: 20 20
Aperture : 1
Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 25
RightStartPixel: 498 413
ROI Left: 93 61

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41
Peak Location : Gaussian 80%
Gain Correction: P/G(s)
PeakShift: Absolute Peak
(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]
DSpacing (Angstroms): 1.1702087
LPA Correction: YES
Psi Zero Assignment (Pixel) : 308.28 261.60

LeftStopPixel : 71 35
RightStopPixel : 508 423
ROI Right : 476 388

STRESS REPORT

File name:

10NOV15_0016

Description

č.3_II

Stress = -165.1 ± 17.8 MPa

ShearStress = -38.3 ± 8.9 MPa

Intensity Ratio:

1.21

1.21

Average Peak Breadth:

5.83 ± 0.32

4.73 ± 0.17

Average Peak FWHM:

5.254 ± 0.34

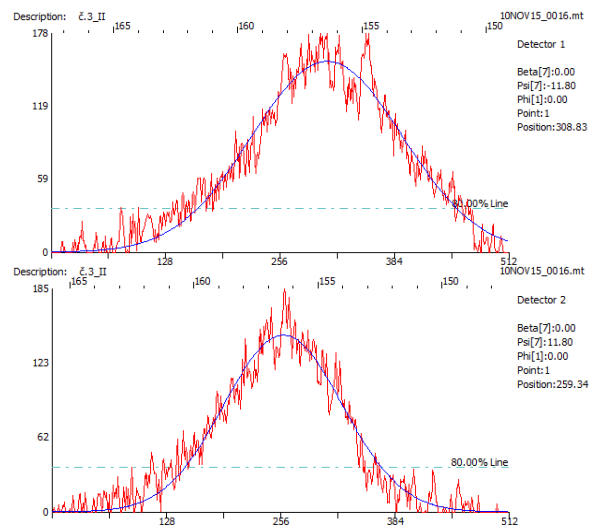
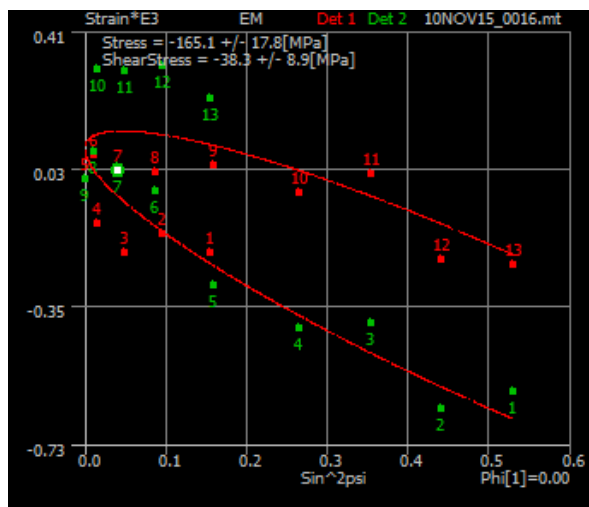
4.537 ± 0.36

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	23.20	0.1553	1.169972	156.52	-0.202	5.146	5.73	188.11
29.92	18.12	0.0968	1.170031	156.49	-0.151	4.842	5.64	201.38
24.73	12.93	0.0501	1.169971	156.52	-0.203	5.507	5.92	175.30
19.23	7.44	0.0167	1.170063	156.48	-0.124	5.290	5.79	184.92
11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	4.832	5.29	198.19
5.52	-6.28	0.0120	1.170289	156.37	0.069	5.721	6.18	166.03
0.00	-11.80	0.0418	1.170235	156.40	0.022	5.854	6.58	178.48
-5.52	-17.31	0.0886	1.170232	156.40	0.020	5.482	6.01	186.89
-11.80	-23.59	0.1602	1.170256	156.39	0.040	5.285	5.92	173.00
-19.23	-31.03	0.2657	1.170163	156.43	-0.039	5.343	5.78	182.79
-24.73	-36.52	0.3542	1.170224	156.40	0.013	5.144	5.69	185.32
-29.92	-41.71	0.4428	1.169949	156.53	-0.222	4.680	5.56	174.78
-35.00	-46.80	0.5313	1.169933	156.54	-0.236	5.184	5.65	168.80

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	46.80	0.5313	1.169523	156.73	-0.586	3.792	4.31	169.25
29.92	41.71	0.4428	1.169465	156.76	-0.636	4.441	4.73	179.58
24.73	36.52	0.3542	1.169743	156.63	-0.398	4.752	4.91	167.85
19.23	31.03	0.2657	1.169727	156.64	-0.411	4.952	4.75	166.50
11.80	23.59	0.1602	1.169866	156.57	-0.293	4.287	4.63	184.32
5.52	17.31	0.0886	1.170172	156.43	-0.031	4.775	4.72	170.47
0.00	11.80	0.0418	1.170239	156.40	0.026	3.919	4.67	184.94
-5.52	6.28	0.0120	1.170297	156.37	0.076	4.547	4.58	176.24
-11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	4.966	4.99	153.30
-19.23	-7.44	0.0167	1.170562	156.24	0.302	4.543	4.82	169.88
-24.73	-12.93	0.0501	1.170556	156.25	0.297	4.609	4.73	159.65
-29.92	-18.12	0.0968	1.170578	156.24	0.315	4.721	4.87	163.71
-35.00	-23.20	0.1553	1.170471	156.29	0.224	4.680	4.83	170.92



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 1.00 1.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 25

RightStartPixel: 498 413

ROI Left: 93 61

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 308.49 258.95

LeftStopPixel : 71 35

RightStopPixel : 508 423

ROI Right : 476 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0002

Description: č.5_I

Stress = -131.4 ± 17.8 MPa**ShearStress = -96.4 ± 9.2 MPa**

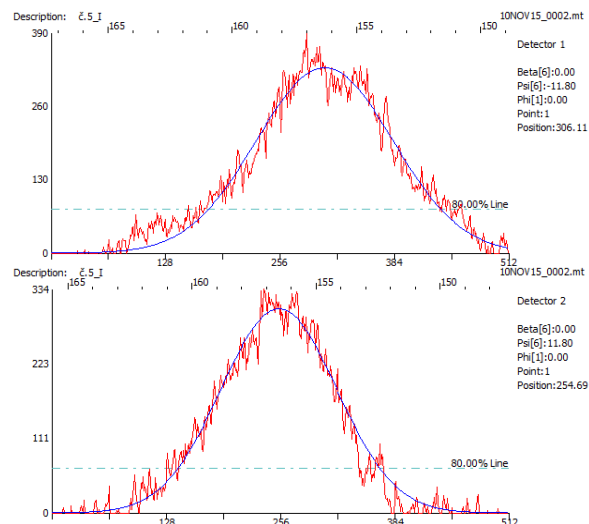
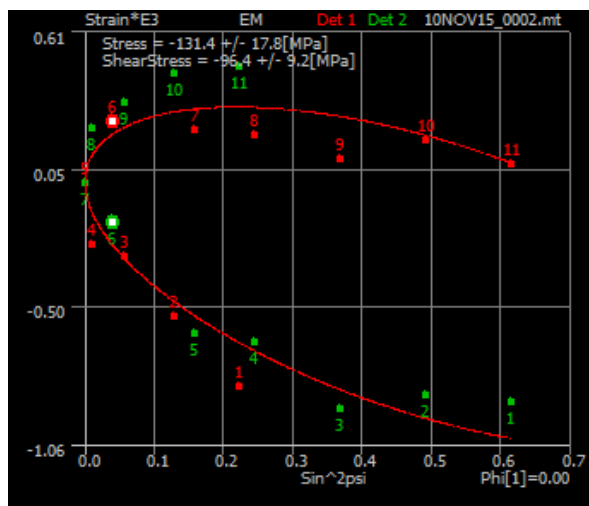
Intensity Ratio: 1.27 1.16
 Average Peak Breadth: 5.72 ± 0.26 4.95 ± 0.15
 Average Peak FWHM: 5.028 ± 0.26 4.738 ± 0.24

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.20	0.2234	1.169246	156.87	-0.822	4.846	5.50	389.02
32.86	21.06	0.1292	1.169572	156.71	-0.544	4.875	5.53	377.62
25.70	13.90	0.0578	1.169854	156.58	-0.303	4.850	5.45	392.59
18.01	6.21	0.0117	1.169916	156.55	-0.251	5.005	5.70	369.28
11.80	0.00	0.0000	1.170207	156.41	-0.002	5.154	5.87	362.72
0.00	-11.80	0.0418	1.170493	156.28	0.243	4.793	5.73	390.40
-11.80	-23.60	0.1602	1.170456	156.29	0.211	4.671	5.80	380.71
-18.01	-29.81	0.2471	1.170427	156.31	0.186	4.982	5.29	390.42
-25.70	-37.50	0.3705	1.170315	156.36	0.091	5.285	6.17	348.85
-32.86	-44.66	0.4940	1.170408	156.32	0.170	5.381	5.89	329.95
-40.00	-51.80	0.6175	1.170291	156.37	0.070	5.465	6.04	309.74

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.169168	156.90	-0.889	4.980	4.96	336.46
32.86	44.66	0.4940	1.169204	156.89	-0.859	4.321	4.67	353.87
25.70	37.50	0.3705	1.169135	156.92	-0.918	4.739	4.93	374.73
18.01	29.81	0.2471	1.169453	156.77	-0.645	4.795	5.02	368.17
11.80	23.60	0.1602	1.169496	156.75	-0.609	4.864	4.93	353.01
0.00	11.80	0.0418	1.170019	156.50	-0.162	5.102	5.15	334.21
-11.80	-0.00	0.0000	1.170207	156.41	-0.001	4.959	5.14	344.12
-18.01	-6.21	0.0117	1.170462	156.29	0.217	4.521	5.09	323.14
-25.70	-13.90	0.0578	1.170580	156.24	0.318	4.676	4.94	359.36
-32.86	-21.06	0.1292	1.170717	156.17	0.434	4.687	4.77	332.18
-40.00	-28.20	0.2234	1.170756	156.15	0.468	4.473	4.83	342.41



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46

RightStartPixel: 488 413

ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 302.41 257.16

LeftStopPixel : 71 56

RightStopPixel : 498 423

ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0003

Description: č.5_II

Stress = -77.3 ± 25.8 MPa

ShearStress = -97.4 ± 13.4 MPa

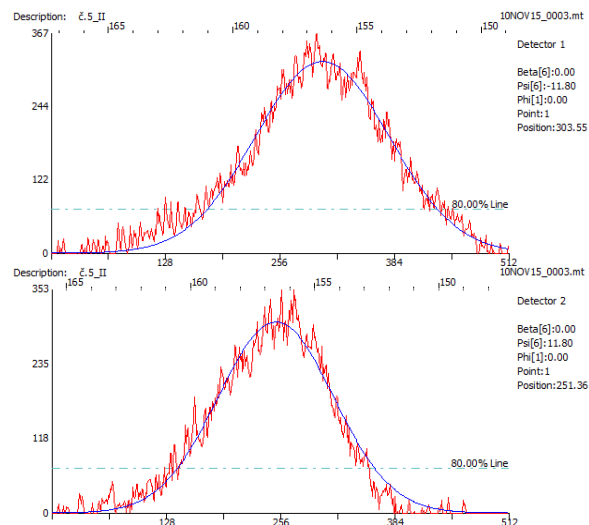
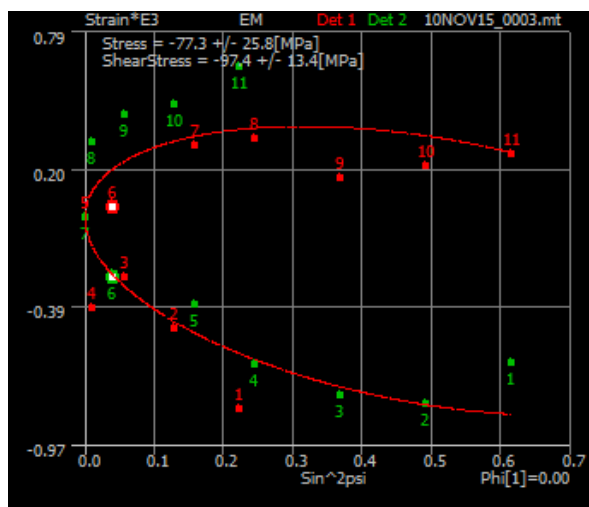
Intensity Ratio: 1.25 1.26
 Average Peak Breadth: 5.64 ± 0.17 4.80 ± 0.15
 Average Peak FWHM: 5.138 ± 0.23 4.695 ± 0.18

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.21	0.2234	1.169241	156.87	-0.827	4.855	5.43	392.40
32.86	21.07	0.1292	1.169644	156.68	-0.483	4.860	5.44	380.24
25.70	13.90	0.0577	1.169901	156.55	-0.263	4.898	5.59	379.18
18.01	6.21	0.0117	1.169747	156.63	-0.394	5.191	5.74	366.91
11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	5.044	5.63	379.67
0.00	-11.80	0.0418	1.170261	156.39	0.045	5.476	5.87	366.60
-11.80	-23.59	0.1602	1.170569	156.24	0.308	5.476	5.84	358.10
-18.01	-29.80	0.2470	1.170598	156.23	0.333	5.281	5.75	327.30
-25.70	-37.49	0.3705	1.170406	156.32	0.169	5.207	5.80	313.26
-32.86	-44.66	0.4940	1.170467	156.29	0.221	5.277	5.57	353.46
-40.00	-51.80	0.6175	1.170526	156.26	0.272	4.951	5.40	324.81

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.169477	156.76	-0.625	4.519	4.67	292.90
32.86	44.66	0.4940	1.169272	156.85	-0.800	4.486	4.72	369.96
25.70	37.49	0.3705	1.169314	156.83	-0.764	4.475	4.56	361.97
18.01	29.80	0.2470	1.169467	156.76	-0.634	4.700	4.80	367.11
11.80	23.59	0.1602	1.169768	156.62	-0.377	4.509	4.59	367.13
0.00	11.80	0.0418	1.169906	156.55	-0.258	4.799	4.85	353.17
-11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	4.958	5.00	349.44
-18.01	-6.21	0.0117	1.170587	156.23	0.324	4.887	4.95	333.42
-25.70	-13.90	0.0577	1.170721	156.17	0.438	4.744	4.88	328.00
-32.86	-21.07	0.1292	1.170771	156.15	0.480	4.893	4.99	338.66
-40.00	-28.21	0.2234	1.170965	156.06	0.646	4.671	4.80	340.04



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha
Wavelength: 2.291
KV:20.00; mA:4.00
Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;
Exp. time: 2.00 2.00
Nr of exp: 20 20
Aperture : 1
Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46
RightStartPixel: 488 413
ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41
Peak Location : Gaussian 80%
Gain Correction: P/G(s)
PeakShift: Absolute Peak
(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]
DSpacing (Angstroms): 1.1702087
LPA Correction: YES
Psi Zero Assignment (Pixel) : 302.86 255.32

LeftStopPixel : 71 56
RightStopPixel : 498 423
ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0004

Description: č.5_III

Stress = -275.8 ± 16.8 MPa**ShearStress** = -88.8 ± 8.7 MPa

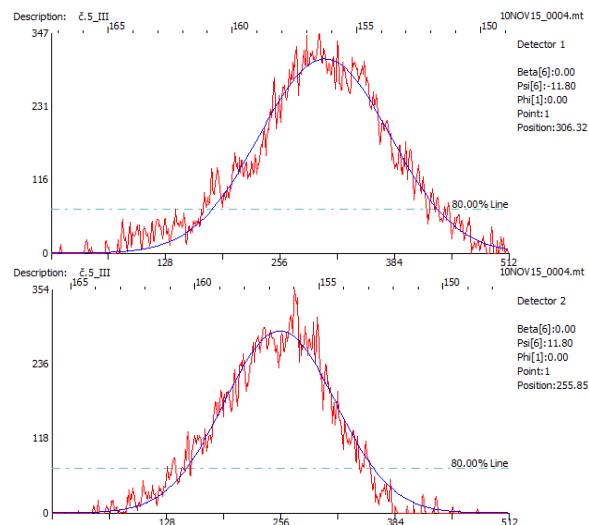
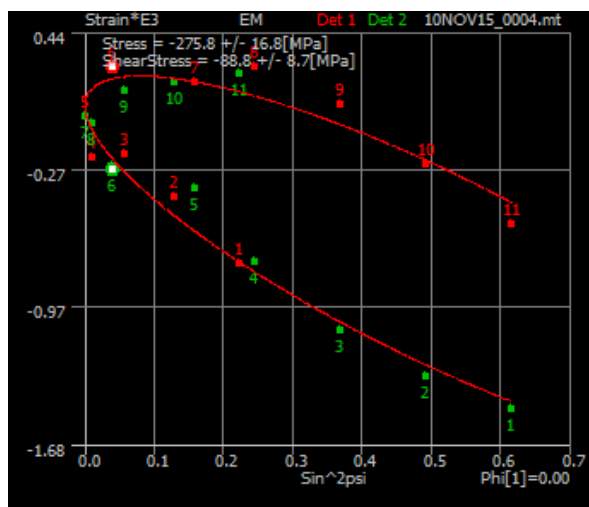
Intensity Ratio: 1.27 1.21
 Average Peak Breadth: 5.47 ± 0.26 4.78 ± 0.22
 Average Peak FWHM: 4.843 ± 0.25 4.640 ± 0.33

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.21	0.2234	1.169330	156.83	-0.750	4.710	5.44	388.38
32.86	21.07	0.1292	1.169727	156.64	-0.412	4.733	5.22	406.91
25.70	13.90	0.0577	1.169982	156.52	-0.194	5.023	5.48	367.96
18.01	6.21	0.0117	1.169963	156.53	-0.210	5.136	5.88	355.08
11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	4.850	5.58	365.77
0.00	-11.80	0.0418	1.170515	156.27	0.262	5.119	5.76	346.86
-11.80	-23.59	0.1602	1.170422	156.31	0.182	5.158	5.61	360.27
-18.01	-29.80	0.2470	1.170516	156.27	0.262	4.390	5.04	379.73
-25.70	-37.49	0.3705	1.170282	156.38	0.063	4.799	5.66	342.00
-32.86	-44.66	0.4940	1.169928	156.54	-0.240	4.791	5.21	339.44
-40.00	-51.80	0.6175	1.169566	156.71	-0.549	4.563	5.34	319.83

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.168449	157.25	-1.504	4.092	4.67	330.16
32.86	44.66	0.4940	1.168653	157.15	-1.330	5.086	5.14	352.29
25.70	37.49	0.3705	1.168926	157.02	-1.096	4.690	4.68	384.07
18.01	29.80	0.2470	1.169339	156.82	-0.743	5.034	5.03	343.45
11.80	23.59	0.1602	1.169776	156.61	-0.369	4.913	4.93	361.67
0.00	11.80	0.0418	1.169897	156.56	-0.266	4.336	4.49	354.24
-11.80	0.00	0.0000	1.170208	156.41	-0.000	4.815	4.93	331.03
-18.01	-6.21	0.0117	1.170176	156.43	-0.028	4.716	4.90	317.64
-25.70	-13.90	0.0577	1.170372	156.33	0.140	4.415	4.50	366.59
-32.86	-21.07	0.1292	1.170424	156.31	0.184	4.694	4.67	354.03
-40.00	-28.21	0.2234	1.170468	156.29	0.221	4.250	4.62	339.28



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46

RightStartPixel: 488 413

ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 302.33 259.92

LeftStopPixel : 71 56

RightStopPixel : 498 423

ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0005

Description: č.5_IV

Stress = -119.8 ± 25.4 MPa

ShearStress = -126.4 ± 13.2 MPa

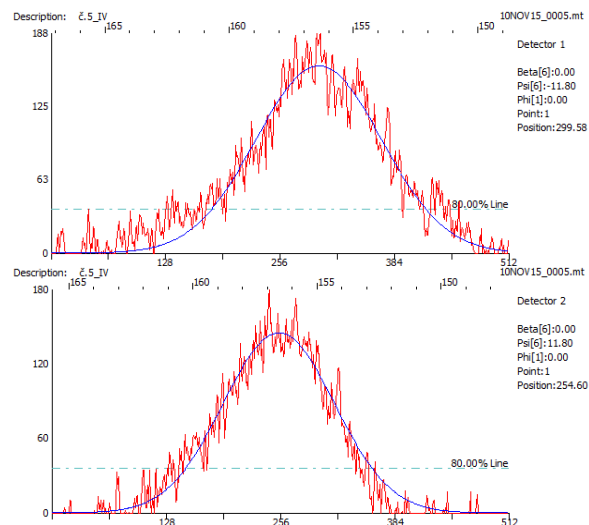
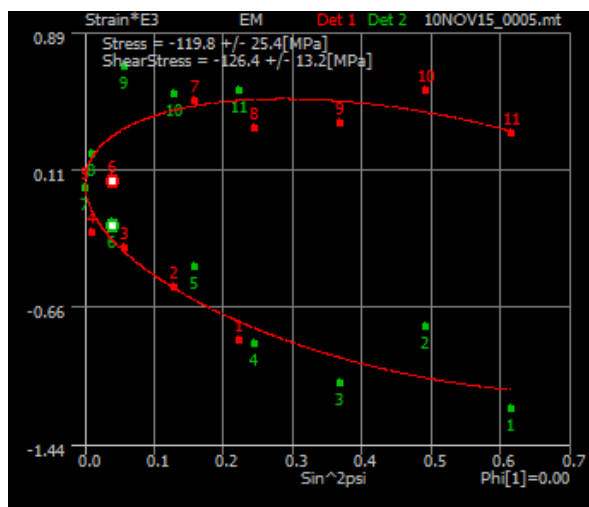
Intensity Ratio: 1.27 1.14
 Average Peak Breadth: 5.21 ± 0.41 4.38 ± 0.27
 Average Peak FWHM: 4.615 ± 0.36 4.017 ± 0.39

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.21	0.2234	1.169204	156.89	-0.858	4.703	5.46	191.33
32.86	21.07	0.1292	1.169555	156.72	-0.559	4.805	5.28	207.57
25.70	13.90	0.0577	1.169814	156.60	-0.337	4.618	5.49	199.01
18.01	6.21	0.0117	1.169926	156.54	-0.242	4.919	5.35	220.08
11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	4.776	5.18	198.60
0.00	-11.80	0.0418	1.170257	156.39	0.041	4.798	5.55	187.78
-11.80	-23.59	0.1602	1.170784	156.14	0.492	4.584	5.40	208.94
-18.01	-29.80	0.2470	1.170612	156.22	0.345	5.188	5.69	187.41
-25.70	-37.49	0.3705	1.170644	156.21	0.372	3.896	4.35	238.28
-32.86	-44.66	0.4940	1.170853	156.11	0.550	4.253	4.67	195.60
-40.00	-51.80	0.6175	1.170570	156.24	0.309	4.220	4.89	190.02

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.168754	157.10	-1.243	4.072	3.97	174.39
32.86	44.66	0.4940	1.169304	156.84	-0.773	4.740	4.80	174.50
25.70	37.49	0.3705	1.168925	157.02	-1.097	4.371	4.65	178.44
18.01	29.80	0.2470	1.169183	156.90	-0.876	3.768	4.11	191.92
11.80	23.59	0.1602	1.169697	156.65	-0.437	4.375	4.66	192.54
0.00	11.80	0.0418	1.169961	156.53	-0.211	4.203	4.40	179.94
-11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	3.536	4.26	169.38
-18.01	-6.21	0.0117	1.170442	156.30	0.199	3.446	4.52	188.99
-25.70	-13.90	0.0577	1.171019	156.03	0.692	3.866	4.01	183.68
-32.86	-21.07	0.1292	1.170838	156.12	0.538	3.861	4.45	173.99
-40.00	-28.21	0.2234	1.170859	156.11	0.556	3.954	4.30	183.15



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46

RightStartPixel: 488 413

ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 298.95 257.83

LeftStopPixel : 71 56

RightStopPixel : 498 423

ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0006

Description: č.7_I

Stress = -140.7 ± 17.7 MPa**ShearStress** = -54.8 ± 9.2 MPa

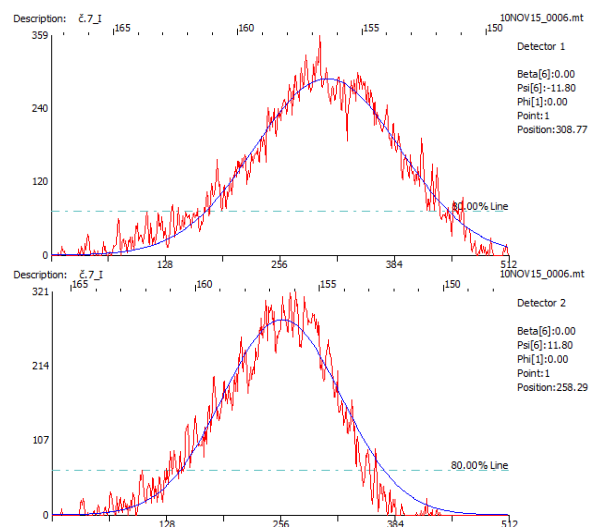
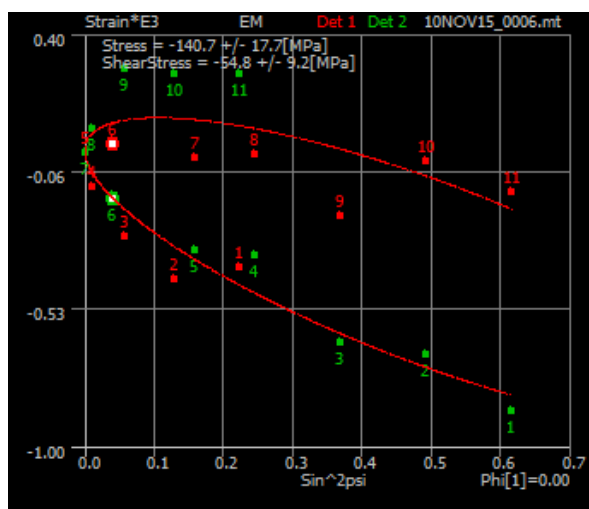
Intensity Ratio: 1.22 1.19
 Average Peak Breadth: 5.64 ± 0.28 4.91 ± 0.21
 Average Peak FWHM: 5.065 ± 0.30 -8.268 ± 43.29

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.20	0.2234	1.169753	156.62	-0.389	4.902	5.85	361.74
32.86	21.06	0.1292	1.169708	156.65	-0.428	4.928	5.81	355.17
25.70	13.90	0.0578	1.169873	156.57	-0.287	5.137	5.67	364.61
18.01	6.21	0.0117	1.170070	156.48	-0.119	5.183	5.80	356.44
11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	5.445	5.77	341.34
0.00	-11.80	0.0418	1.170238	156.40	0.025	5.430	5.68	359.33
-11.80	-23.60	0.1602	1.170185	156.42	-0.020	5.386	5.97	328.38
-18.01	-29.81	0.2471	1.170203	156.41	-0.005	5.139	5.44	347.67
-25.70	-37.50	0.3705	1.169958	156.53	-0.214	4.961	5.49	301.59
-32.86	-44.66	0.4940	1.170171	156.43	-0.032	4.618	5.65	322.80
-40.00	-51.80	0.6175	1.170050	156.48	-0.135	4.582	4.95	367.22

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.169179	156.90	-0.880	4.466	4.42	341.39
32.86	44.66	0.4940	1.169403	156.79	-0.688	4.764	4.89	296.63
25.70	37.50	0.3705	1.169456	156.77	-0.643	4.796	4.99	353.30
18.01	29.81	0.2471	1.169797	156.60	-0.352	5.094	5.12	307.23
11.80	23.60	0.1602	1.169822	156.59	-0.331	4.734	4.69	338.75
0.00	11.80	0.0418	1.170023	156.50	-0.159	4.763	4.99	320.58
-11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	-138.804	5.09	336.02
-18.01	-6.21	0.0117	1.170306	156.36	0.083	4.994	5.07	316.15
-25.70	-13.90	0.0578	1.170543	156.25	0.286	4.806	5.03	310.97
-32.86	-21.06	0.1292	1.170521	156.26	0.267	4.727	4.84	305.17
-40.00	-28.20	0.2234	1.170520	156.26	0.266	4.717	4.83	307.03



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46

RightStartPixel: 488 413

ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 308.38 260.71

LeftStopPixel : 71 56

RightStopPixel : 498 423

ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: vzorka_7_II

Description: č.7_I

Stress = -150.9 ± 17.6 MPa**ShearStress** = -49.1 ± 9.2 MPa

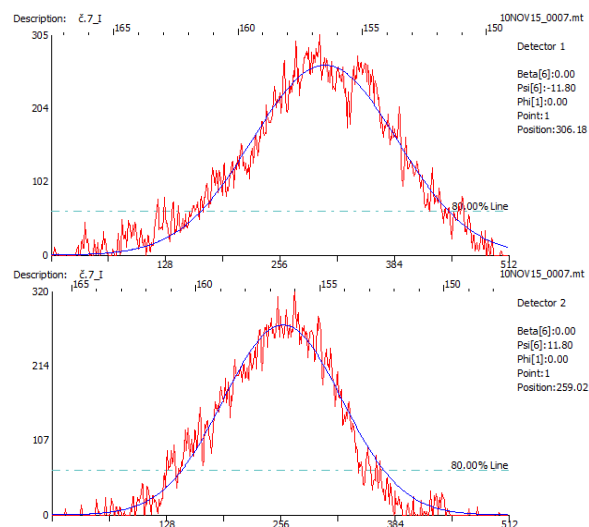
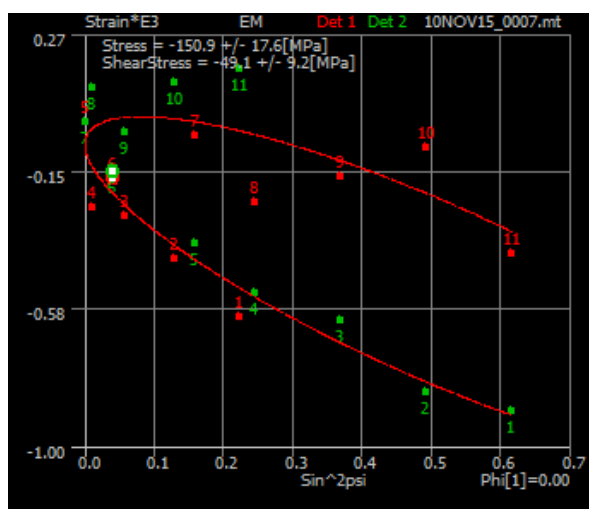
Intensity Ratio: 1.13 1.17
 Average Peak Breadth: 5.67 ± 0.29 4.87 ± 0.17
 Average Peak FWHM: 5.124 ± 0.54 4.772 ± 0.25

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.21	0.2234	1.169505	156.74	-0.601	5.366	5.70	325.47
32.86	21.07	0.1292	1.169716	156.64	-0.421	5.671	5.86	325.63
25.70	13.90	0.0577	1.169868	156.57	-0.291	5.451	5.99	327.99
18.01	6.21	0.0117	1.169900	156.56	-0.264	4.767	5.62	346.16
11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	5.538	5.73	320.95
0.00	-11.80	0.0418	1.170004	156.51	-0.175	5.758	6.09	305.39
-11.80	-23.59	0.1602	1.170158	156.43	-0.043	5.481	5.97	320.62
-18.01	-29.80	0.2470	1.169917	156.55	-0.249	4.889	5.19	333.45
-25.70	-37.49	0.3705	1.170008	156.50	-0.171	4.811	5.44	334.42
-32.86	-44.66	0.4940	1.170112	156.46	-0.083	4.003	5.34	321.97
-40.00	-51.80	0.6175	1.169734	156.63	-0.405	4.631	5.49	310.91

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.169162	156.91	-0.895	4.684	4.76	326.42
32.86	44.66	0.4940	1.169234	156.87	-0.833	4.582	4.71	342.45
25.70	37.49	0.3705	1.169489	156.75	-0.615	4.775	4.93	309.90
18.01	29.80	0.2470	1.169589	156.70	-0.530	4.678	4.88	326.08
11.80	23.59	0.1602	1.169768	156.62	-0.376	4.474	4.66	349.71
0.00	11.80	0.0418	1.170030	156.49	-0.153	4.915	4.86	320.40
-11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	4.790	4.82	313.38
-18.01	-6.21	0.0117	1.170328	156.35	0.102	4.747	4.85	332.04
-25.70	-13.90	0.0577	1.170170	156.43	-0.033	5.404	5.33	304.76
-32.86	-21.07	0.1292	1.170347	156.35	0.118	4.544	4.86	298.32
-40.00	-28.21	0.2234	1.170400	156.32	0.164	4.901	4.92	301.40



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46

RightStartPixel: 488 413

ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 308.85 261.35

LeftStopPixel : 71 56

RightStopPixel : 498 423

ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: vzorka_7_III

Description: č.7_III

Stress = -137.1 ± 22.8 MPa**ShearStress** = -44.8 ± 11.8 MPa

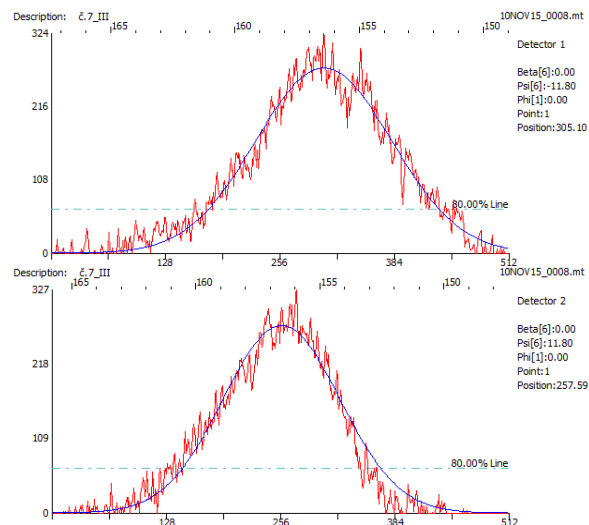
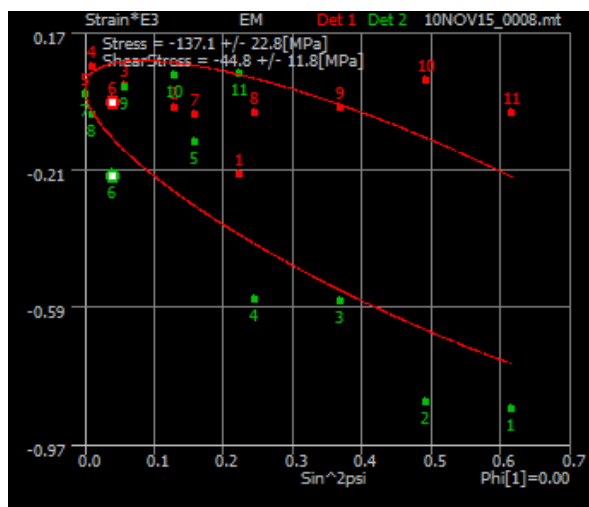
Intensity Ratio: 1.21 1.07
 Average Peak Breadth: 5.68 ± 0.22 4.80 ± 0.24
 Average Peak FWHM: 5.047 ± 0.23 4.699 ± 0.19

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.21	0.2234	1.169950	156.53	-0.221	5.189	5.66	353.62
32.86	21.07	0.1292	1.170162	156.43	-0.040	4.965	5.56	359.14
25.70	13.90	0.0577	1.170234	156.40	0.021	4.815	5.95	336.88
18.01	6.21	0.0117	1.170298	156.37	0.077	5.146	5.68	345.89
11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.001	5.250	5.85	339.58
0.00	-11.80	0.0418	1.170182	156.42	-0.023	5.322	5.67	323.79
-11.80	-23.59	0.1602	1.170142	156.44	-0.057	5.204	6.11	314.03
-18.01	-29.80	0.2470	1.170147	156.44	-0.053	5.025	5.40	340.57
-25.70	-37.49	0.3705	1.170164	156.43	-0.038	4.712	5.52	325.41
-32.86	-44.66	0.4940	1.170251	156.39	0.036	4.659	5.38	322.87
-40.00	-51.80	0.6175	1.170146	156.44	-0.054	5.226	5.66	297.12

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.169187	156.89	-0.873	4.572	4.37	332.02
32.86	44.66	0.4940	1.169213	156.88	-0.851	5.032	5.08	320.38
25.70	37.49	0.3705	1.169537	156.73	-0.574	4.929	5.06	315.22
18.01	29.80	0.2470	1.169546	156.72	-0.566	4.579	5.10	317.69
11.80	23.59	0.1602	1.170052	156.48	-0.134	4.544	4.53	313.60
0.00	11.80	0.0418	1.169945	156.53	-0.226	4.657	4.77	326.73
-11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	4.612	4.68	324.03
-18.01	-6.21	0.0117	1.170142	156.44	-0.057	4.488	4.75	315.81
-25.70	-13.90	0.0577	1.170230	156.40	0.019	4.995	4.91	322.26
-32.86	-21.07	0.1292	1.170269	156.38	0.051	4.720	4.94	310.11
-40.00	-28.21	0.2234	1.170272	156.38	0.054	4.563	4.67	316.73



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha
 Wavelength: 2.291
 KV:20.00; mA:4.00
 Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;
 Exp. time: 2.00 2.00
 Nr of exp: 20 20
 Aperture : 1
 Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46
 RightStartPixel: 488 413
 ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41
 Peak Location : Gaussian 80%
 Gain Correction: P/G(s)
 PeakShift: Absolute Peak
 (1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]
 DSpacing (Angstroms): 1.1702087
 LPA Correction: YES
 Psi Zero Assignment (Pixel) : 305.45 261.05

LeftStopPixel : 71 56
 RightStopPixel : 498 423
 ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0009

Description: č.7_IV

Stress = -158.7 ± 14.9 MPa**ShearStress** = -47.0 ± 7.8 MPa

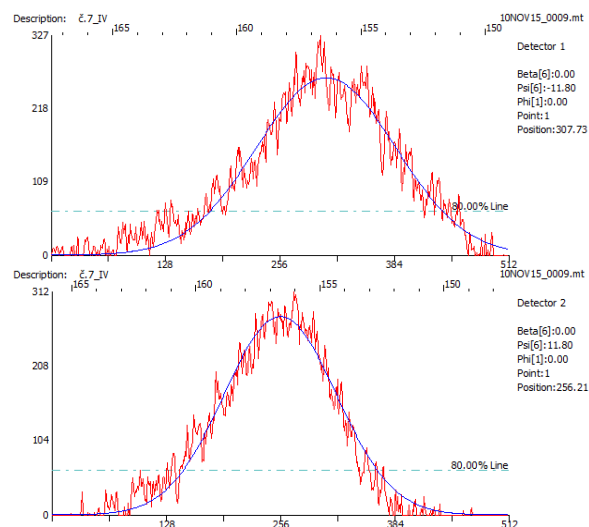
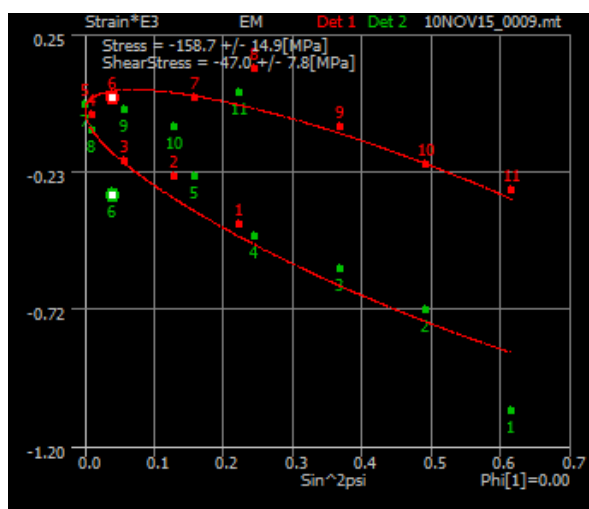
Intensity Ratio: 1.16 1.25
 Average Peak Breadth: 5.65 ± 0.35 4.83 ± 0.34
 Average Peak FWHM: 5.183 ± 0.39 4.722 ± 0.30

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	28.21	0.2234	1.169714	156.64	-0.423	5.751	6.22	320.40
32.86	21.07	0.1292	1.169910	156.55	-0.255	5.185	5.55	349.85
25.70	13.90	0.0577	1.169978	156.52	-0.197	5.049	5.62	346.20
18.01	6.21	0.0117	1.170167	156.43	-0.036	5.398	5.93	328.46
11.80	-0.00	0.0000	1.170208	156.41	-0.000	5.919	6.20	317.02
0.00	-11.80	0.0418	1.170237	156.40	0.024	4.939	5.58	326.87
-11.80	-23.59	0.1602	1.170237	156.40	0.024	5.061	5.48	328.49
-18.01	-29.80	0.2470	1.170360	156.34	0.129	5.211	5.51	327.55
-25.70	-37.49	0.3705	1.170116	156.45	-0.079	4.704	5.27	317.76
-32.86	-44.66	0.4940	1.169966	156.52	-0.207	4.639	5.10	314.95
-40.00	-51.80	0.6175	1.169855	156.58	-0.302	5.155	5.74	300.57

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
40.00	51.80	0.6175	1.168945	157.01	-1.080	4.850	4.93	305.61
32.86	44.66	0.4940	1.169365	156.81	-0.721	4.118	4.05	362.39
25.70	37.49	0.3705	1.169531	156.73	-0.579	4.611	4.84	323.73
18.01	29.80	0.2470	1.169666	156.67	-0.464	4.779	4.87	311.55
11.80	23.59	0.1602	1.169915	156.55	-0.251	4.323	4.51	315.55
0.00	11.80	0.0418	1.169832	156.59	-0.322	4.804	4.94	311.85
-11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	4.676	4.74	310.45
-18.01	-6.21	0.0117	1.170101	156.46	-0.092	5.073	5.08	298.71
-25.70	-13.90	0.0577	1.170190	156.42	-0.016	4.783	5.04	291.33
-32.86	-21.07	0.1292	1.170118	156.45	-0.077	5.172	5.35	289.51
-40.00	-28.21	0.2234	1.170260	156.39	0.044	4.748	4.81	298.95



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 46

RightStartPixel: 488 413

ROI Left: 121 77

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 307.36 261.13

LeftStopPixel : 71 56

RightStopPixel : 498 423

ROI Right : 457 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0011

Description: č.8_I

Stress = -200.9 ± 20.5 MPa**ShearStress = 33.2 ± 10.4 MPa**

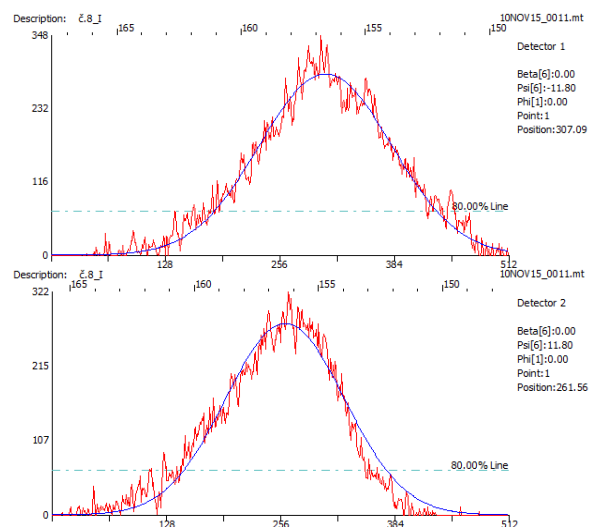
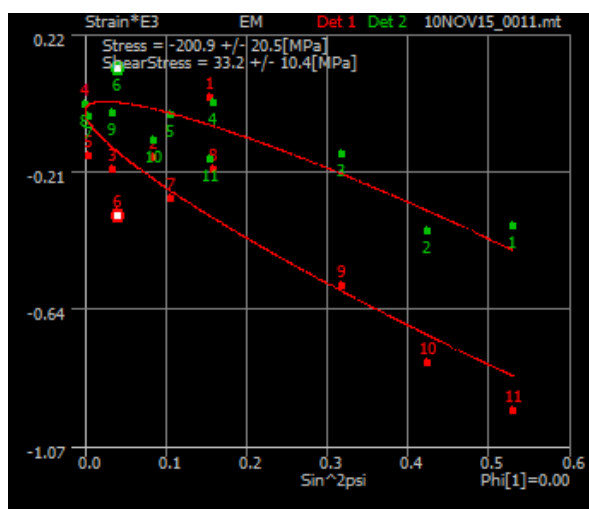
Intensity Ratio: 1.09 1.13
 Average Peak Breadth: 5.82 ± 0.28 5.06 ± 0.15
 Average Peak FWHM: 5.310 ± 0.38 4.787 ± 0.22

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	23.20	0.1553	1.170236	156.40	0.024	6.055	6.41	320.35
28.89	17.09	0.0864	1.170018	156.50	-0.163	5.633	6.19	333.76
22.58	10.78	0.0350	1.169973	156.52	-0.202	5.560	5.87	333.63
11.80	0.00	0.0000	1.170208	156.41	-0.001	5.540	5.93	337.51
7.23	-4.57	0.0063	1.170022	156.50	-0.160	5.196	5.84	342.53
0.00	-11.80	0.0418	1.169803	156.60	-0.347	5.160	5.58	348.26
-7.23	-19.03	0.1063	1.169865	156.57	-0.294	4.968	5.84	332.31
-11.80	-23.60	0.1602	1.169971	156.52	-0.203	5.548	5.81	349.01
-22.58	-34.38	0.3188	1.169545	156.72	-0.567	4.952	5.60	348.27
-28.89	-40.69	0.4250	1.169264	156.86	-0.807	4.996	5.50	330.79
-35.00	-46.80	0.5313	1.169085	156.94	-0.960	4.801	5.50	338.57

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	46.80	0.5313	1.169762	156.62	-0.382	4.323	4.76	319.61
28.89	40.69	0.4250	1.169746	156.63	-0.395	4.881	5.05	307.40
22.58	34.38	0.3188	1.170031	156.49	-0.152	4.613	4.98	347.26
11.80	23.60	0.1602	1.170214	156.41	0.005	4.717	5.01	331.77
7.23	19.03	0.1063	1.170172	156.43	-0.032	4.726	5.01	318.71
0.00	11.80	0.0418	1.170344	156.35	0.116	4.691	5.00	322.07
-7.23	4.57	0.0063	1.170164	156.43	-0.038	5.047	5.20	316.61
-11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.000	4.924	5.26	333.05
-22.58	-10.78	0.0350	1.170182	156.42	-0.023	4.705	4.97	329.94
-28.89	-17.09	0.0864	1.170075	156.47	-0.114	5.018	5.19	318.83
-35.00	-23.20	0.1553	1.170010	156.50	-0.169	5.012	5.23	330.58



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV: 20.00; **mA:** 4.00

Beta Osc: 3.00; **Phi Osc:** 0.00; **X Osc:** 0.00; **Y Osc:** 0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 25

RightStartPixel: 498 413

ROI Left: 93 61

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2: 5.92 E-6 [1/MPa] **-S1:** 1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 312.40 259.80

LeftStopPixel : 71 35

RightStopPixel : 508 423

ROI Right : 476 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0012

Description: č.8_II

Stress = -153.1 ± 13.4 MPa**ShearStress = 29.3 ± 6.7 MPa**

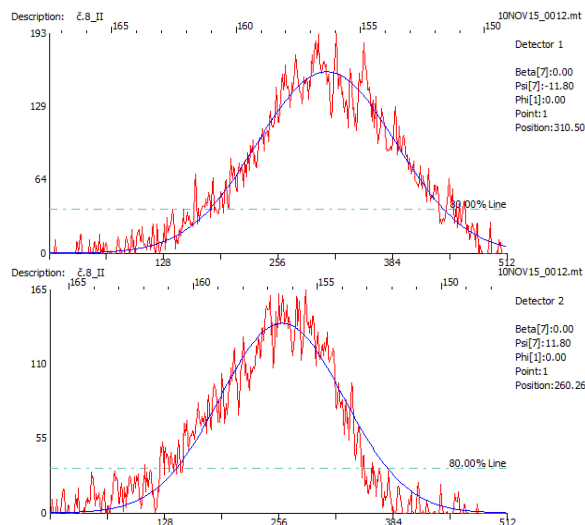
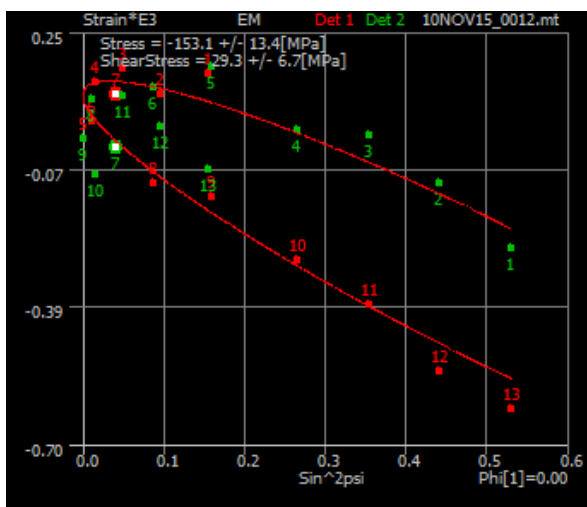
Intensity Ratio: 1.14 1.16
 Average Peak Breadth: 5.74 ± 0.36 4.82 ± 0.28
 Average Peak FWHM: 5.065 ± 0.65 4.533 ± 0.45

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	23.20	0.1553	1.170384	156.33	0.150	5.621	6.08	176.53
29.92	18.13	0.0968	1.170331	156.35	0.104	5.286	5.87	185.01
24.73	12.93	0.0501	1.170398	156.32	0.162	5.964	6.38	183.43
19.23	7.43	0.0167	1.170362	156.34	0.131	5.323	5.84	199.81
11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	0.001	5.232	5.87	191.22
5.52	-6.28	0.0119	1.170253	156.39	0.038	5.529	5.99	185.68
0.00	-11.80	0.0418	1.170330	156.35	0.104	5.196	5.81	193.32
-5.52	-17.32	0.0886	1.170088	156.47	-0.103	5.367	5.89	194.26
-11.80	-23.60	0.1602	1.170052	156.48	-0.134	4.796	5.65	195.21
-19.23	-31.03	0.2656	1.169881	156.56	-0.280	4.762	5.36	194.77
-24.73	-36.53	0.3542	1.169759	156.62	-0.385	4.757	5.16	193.63
-29.92	-41.72	0.4428	1.169578	156.71	-0.539	4.722	5.50	175.09
-35.00	-46.80	0.5313	1.169477	156.76	-0.625	3.287	5.17	192.82

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	46.80	0.5313	1.169913	156.55	-0.253	4.529	4.84	171.78
29.92	41.72	0.4428	1.170086	156.47	-0.105	4.548	4.68	177.91
24.73	36.53	0.3542	1.170218	156.41	0.008	3.255	4.12	188.88
19.23	31.03	0.2656	1.170232	156.40	0.020	4.914	4.95	162.43
11.80	23.60	0.1602	1.170404	156.32	0.167	4.436	4.65	174.47
5.52	17.32	0.0886	1.170347	156.35	0.118	4.117	4.50	182.50
0.00	11.80	0.0418	1.170184	156.42	-0.021	4.771	5.13	164.99
-5.52	6.28	0.0119	1.170316	156.36	0.092	4.622	4.87	171.54
-11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	4.856	5.12	172.90
-19.23	-7.43	0.0167	1.170109	156.46	-0.085	4.686	4.89	171.83
-24.73	-12.93	0.0501	1.170322	156.36	0.097	4.440	4.96	175.26
-29.92	-18.13	0.0968	1.170242	156.39	0.029	4.877	5.08	174.64
-35.00	-23.20	0.1553	1.170127	156.45	-0.070	4.879	4.84	169.46



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 2.00 2.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 25

RightStartPixel: 498 413

ROI Left: 93 61

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 308.92 260.58

LeftStopPixel : 71 35

RightStopPixel : 508 423

ROI Right : 476 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0013

Description: č.8_III

Stress = -277.6 ± 18.3 MPa**ShearStress = 51.9 ± 9.2 MPa**

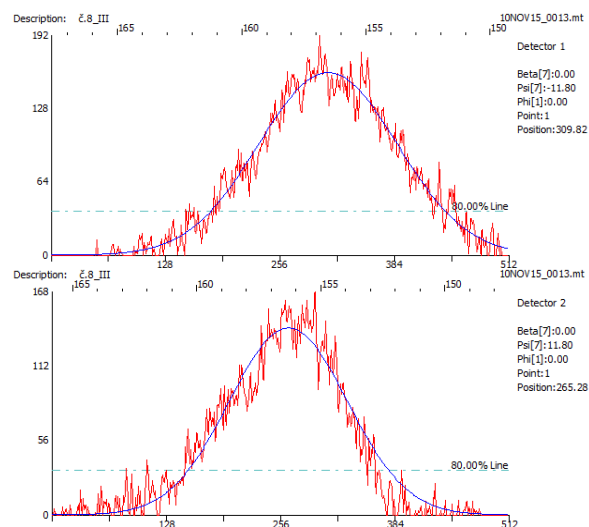
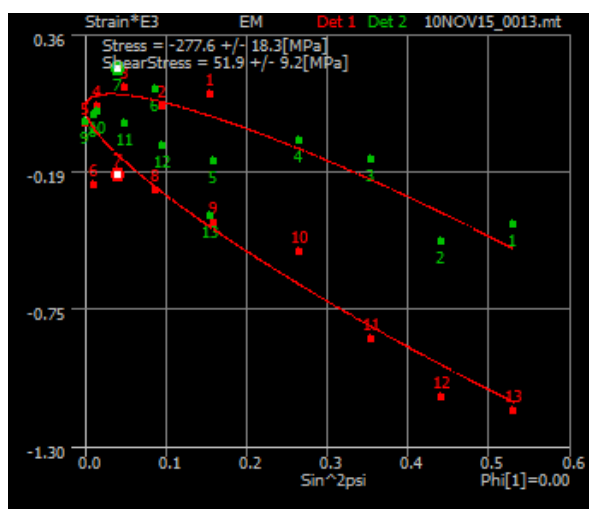
Intensity Ratio: 1.20 1.21
 Average Peak Breadth: 5.76 ± 0.36 4.81 ± 0.20
 Average Peak FWHM: 5.211 ± 0.49 4.517 ± 0.23

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	23.20	0.1553	1.170338	156.35	0.111	5.745	6.26	183.33
29.92	18.12	0.0968	1.170286	156.37	0.066	5.637	5.99	178.32
24.73	12.93	0.0501	1.170373	156.33	0.141	5.958	6.06	178.67
19.23	7.44	0.0167	1.170285	156.37	0.065	5.785	6.18	181.50
11.80	-0.00	0.0000	1.170208	156.41	-0.001	5.325	5.78	191.72
5.52	-6.28	0.0120	1.169914	156.55	-0.252	5.563	6.18	187.22
0.00	-11.80	0.0418	1.169961	156.53	-0.212	5.227	5.74	192.31
-5.52	-17.31	0.0886	1.169889	156.56	-0.273	4.863	5.51	188.19
-11.80	-23.59	0.1602	1.169735	156.63	-0.405	4.692	5.36	200.36
-19.23	-31.03	0.2657	1.169604	156.70	-0.516	4.944	5.59	209.50
-24.73	-36.52	0.3542	1.169196	156.89	-0.865	4.579	5.16	214.22
-29.92	-41.71	0.4428	1.168921	157.02	-1.100	4.541	5.34	195.74
-35.00	-46.80	0.5313	1.168852	157.06	-1.159	4.878	5.77	205.05

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	46.80	0.5313	1.169733	156.63	-0.407	4.752	4.91	160.09
29.92	41.71	0.4428	1.169654	156.67	-0.474	4.328	4.74	170.45
24.73	36.52	0.3542	1.170039	156.49	-0.145	4.555	4.65	173.50
19.23	31.03	0.2657	1.170125	156.45	-0.072	4.245	4.68	168.55
11.80	23.59	0.1602	1.170028	156.49	-0.154	4.263	4.52	174.57
5.52	17.31	0.0886	1.170363	156.34	0.132	4.237	4.78	175.85
0.00	11.80	0.0418	1.170464	156.29	0.218	4.704	4.81	167.94
-5.52	6.28	0.0120	1.170245	156.39	0.031	4.876	5.14	166.60
-11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	4.706	4.85	165.95
-19.23	-7.44	0.0167	1.170257	156.39	0.042	4.821	5.16	168.18
-24.73	-12.93	0.0501	1.170206	156.41	-0.002	4.520	4.99	173.59
-29.92	-18.12	0.0968	1.170103	156.46	-0.090	4.302	4.58	193.36
-35.00	-23.20	0.1553	1.169773	156.62	-0.372	4.410	4.75	175.42



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 1.00 1.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 25

RightStartPixel: 498 413

ROI Left: 93 61

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 313.06 261.96

LeftStopPixel : 71 35

RightStopPixel : 508 423

ROI Right : 476 388

STRESS REPORT

File name: 10NOV15_0014

Description: č.8_IV

Stress = -153.9 ± 19.8 MPa**ShearStress = 41.1 ± 9.8 MPa**

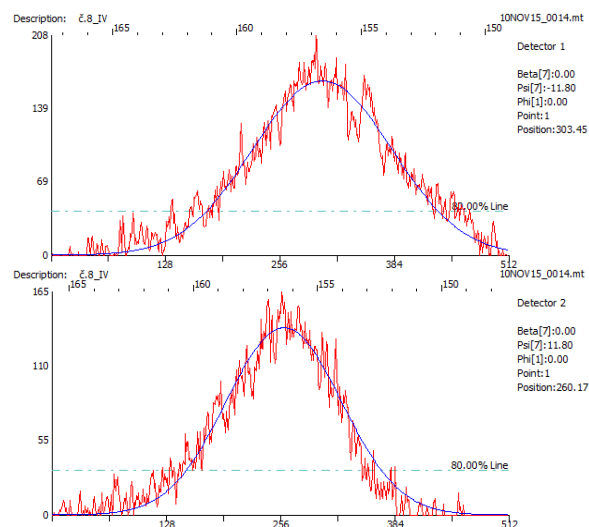
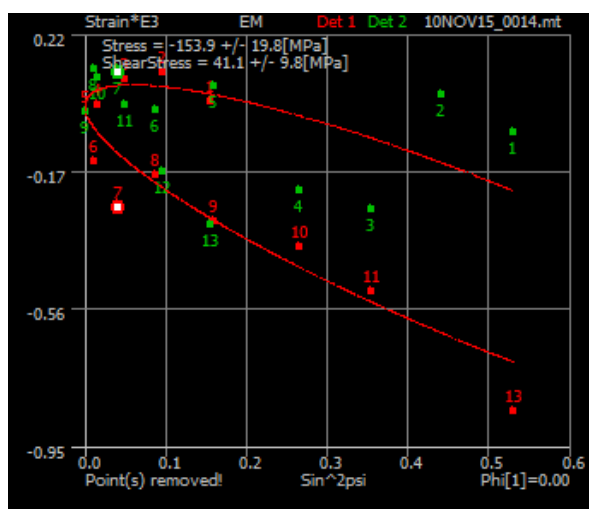
Intensity Ratio: 1.25 1.12
 Average Peak Breadth: 5.62 ± 0.36 4.77 ± 0.22
 Average Peak FWHM: 4.819 ± 0.49 4.594 ± 0.32

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	23.20	0.1553	1.170244	156.39	0.030	4.682	5.96	180.96
29.92	18.13	0.0968	1.170343	156.35	0.114	5.033	5.82	181.96
24.73	12.93	0.0501	1.170320	156.36	0.095	5.538	5.81	192.98
19.23	7.43	0.0167	1.170233	156.40	0.021	4.755	6.01	189.75
11.80	0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	4.802	5.36	201.27
5.52	-6.28	0.0119	1.170044	156.49	-0.141	4.886	5.65	195.51
0.00	-11.80	0.0418	1.169891	156.56	-0.271	4.886	5.69	207.93
-5.52	-17.32	0.0886	1.170001	156.51	-0.177	5.274	5.91	180.95
-11.80	-23.60	0.1602	1.169846	156.58	-0.310	4.804	5.40	218.71
-19.23	-31.03	0.2656	1.169759	156.62	-0.384	3.477	4.72	226.01
-24.73	-36.53	0.3542	1.169616	156.69	-0.506	4.741	5.41	199.30
-35.00	-46.80	0.5313	1.169213	156.88	-0.851	4.953	5.67	183.20

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
35.00	46.80	0.5313	1.170143	156.44	-0.057	4.303	4.47	161.42
29.92	41.72	0.4428	1.170267	156.38	0.050	4.653	4.82	175.47
24.73	36.53	0.3542	1.169886	156.56	-0.276	3.841	4.59	161.06
19.23	31.03	0.2656	1.169952	156.53	-0.219	4.310	4.40	180.14
11.80	23.60	0.1602	1.170294	156.37	0.073	4.670	4.82	171.48
5.52	17.32	0.0886	1.170219	156.41	0.009	4.698	4.79	166.21
0.00	11.80	0.0418	1.170344	156.35	0.116	4.611	4.78	165.27
-5.52	6.28	0.0119	1.170356	156.34	0.126	4.640	4.83	173.03
-11.80	-0.00	0.0000	1.170209	156.41	-0.000	4.886	5.15	169.71
-19.23	-7.43	0.0167	1.170324	156.36	0.099	4.356	4.52	171.76
-24.73	-12.93	0.0501	1.170234	156.40	0.022	4.900	4.87	168.05
-29.92	-18.13	0.0968	1.170013	156.50	-0.167	4.875	4.94	177.62
-35.00	-23.20	0.1553	1.169834	156.59	-0.320	4.979	4.99	174.54



PARAMETERS

Material : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)

Tube: Cr_K-Alpha

Wavelength: 2.291

KV:20.00; mA:4.00

Beta Osc:3.00; Phi Osc:0.00; X Osc:0.00; Y Osc:0.00;

Exp. time: 1.00 1.00

Nr of exp: 20 20

Aperture : 1

Filters : 1

Background static fit:

LeftStartPixel : 61 25

RightStartPixel: 498 413

ROI Left: 93 61

Comments:

Units: MPa

Bragg Angle: 156.41

Peak Location : Gaussian 80%

Gain Correction: P/G(s)

PeakShift: Absolute Peak

(1/2)S2:5.92 E-6 [1/MPa] -S1:1.28 E-6 [1/MPa]

DSpacing (Angstroms): 1.1702087

LPA Correction: YES

Psi Zero Assignment (Pixel) : 307.60 258.40

LeftStopPixel : 71 35

RightStopPixel : 508 423

ROI Right : 476 388

